



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

DISEÑO DE PIEZAS MODELADAS CON UNA IMPRESORA 3D  
PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE  
LA ASIGNATURA DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y  
TEORÍA DE ESTRUCTURAS

*Proyecto de fin de grado en Ingeniería Mecánica*

Autor: Moises Pérez Wic

Directora: Montserrat Sánchez Romero

Co-Director: Rafael Weiler Pérez

## Resumen

Durante los últimos años ha aparecido con fuerza la impresión 3D y ha traído muchos avances, tanto en el ámbito doméstico como en el ámbito empresarial en sectores de ingeniería, biomedicina, industria de la moda...

La mayoría de las empresas actualmente disponen de al menos una impresora 3D para el prototipo inicial de componentes y realizar un estudio de viabilidad.

En este trabajo de final de grado se enfoca en la realización de una guía que abarca desde la elección del material, el diseño y forma de la probeta hasta impresión de las probetas con una impresora 3D para posteriormente ser ensayadas por los alumnos de la asignatura de *Resistencia de materiales y Teoría de estructuras*.

Esta guía tendrá realimentación por parte del alumno para que pueda proponer variaciones y nuevas ideas para que esta guía se pueda complementar con el transcurso de los años.

## **Motivación personal**

El interés por la impresión 3D en mi caso particular viene de hace años, concretamente en el trabajo de recerca del instituto el proyecto a realizar fue la construcción de una mano biónica a partir de una impresora 3D.

En aquel momento el objetivo principal era la construcción de la mano, pero ahora estando en el grado me ha parecido más interesante enfocarlo en el comportamiento físico de las piezas según el tipo de material y/o forma para posteriormente ser ensayado.

Además como se ha mencionado anteriormente la mayoría de empresas disponen de impresoras 3D con la cual cosa es un campo en el cual es muy interesante y viable en el cual trabajar.

# Índice de contenidos

1. Objetivo	5
1.2 Alcance	6
2. Estado del arte	6
2.1 La impresión 3D	7
2.2 Tecnologías de fabricación 3D	8
2.2.1 Base sólida	8
2.2.2 Base líquida	9
2.2.3 Base polvo	10
2.3 Materiales	11
2.3.1 ABS	11
2.3.2 PLA	11
2.3.3 PETG	12
2.3.4 NAILON	13
2.3.5 TPE	13
2.3.6 POLICARBONATO	14
2.4 Software	15
2.4.1 CURA	15
2.4.2 Slic3r	16
2.5 Campos de uso de la impresión 3D	17
2.5.1 Moda	17
2.5.2 Deportes	17
2.5.3 Alimentación	18
2.5.4 Medicina	19
3. Variables	21
3.1 Patrón de relleno	21
3.2 Espesor de relleno/Altura de capa	23
3.3 Densidad de relleno	23
3.4 Forma de la probeta	25
4. Ensayos a elegir	26
4.1.1 Ensayo a tracción	26
4.1.2 Ensayo a compresión	26

4.1.3 Ensayo a flexión	26
4.1.4 Ensayo a torsión	27
4.2 Ensayos NO destructivos	28
4.2.1 Ensayo a través de elementos finitos	28
4.2.2 Ensayo de deformación por extensometría eléctrica resistiva	29
4.2.3 Ensayo por flexión desviada	29
5. Metodología y guía de la práctica	30
6. Software de impresión: Slic3r	31
6.1 Configuración inicial	31
7. Hoja de la práctica	35
8. Hoja de la práctica: Prueba piloto	40
9. Test de conocimientos	51
10. Presupuesto	52
11. Pliego de condiciones	53
11.1 Ensayos de tracción para materiales plásticos	53
12. Conclusiones globales	55
13. Líneas futuras	56
14. Agradecimientos	57
15. Bibliografía	58
16. Anejos	62

## **1. Objetivo**

El objetivo principal de este proyecto es hacer una guía de como realizar componentes en 3D para posteriormente ser ensayados en laboratorio de las asignaturas del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería.

Las fases consistirán en; diseñar las piezas, imprimirlas con tecnología 3D, elegir las variables a estudiar, definir los ensayos, elaborar guía práctica y el informe resultados.

### **1.2 Alcance**

El límite del alcance de este proyecto lo marcan los ensayos que estén disponibles a realizar con las asignaturas de Resistencia de Material y Teoría de Estructuras, ya que la gran mayoría de ensayos mecánicos si se pueden realizar pero otros como podrían ser térmicos quizás ya no es posible por el departamento.

Con la cual cosa se podría decir que este proyecto es una primera fase y que con el paso de los años se puedan incorporar más ensayos para que los alumnos tengan un abanico más amplio.

## 2. Estado del arte

### 2.0 Timing del proyecto

En la tabla que se adjunta a continuación se detalla paso por paso la estructuración de las semanas para realizar el proyecto desde la redacción de la introducción, como el estado del arte hasta la bibliografía y los anexos.

Cabe destacar que este diagrama es una aproximación debido de que durante la redacción de una apartado ya estaba trabajando por encima en otro o apuntando posibles ideas para posteriormente añadirlas.

PHASE	WEEK 1	WEEK 2	WEEK 3	WEEK 4	WEEK 5	WEEK 6	WEEK 7	WEEK 8	WEEK 9	WEEK 10	WEEK 11	WEEK 12	WEEK 13	WEEK 14	WEEK 15	WEEK 16
Introduction																
State of the art																
Explanation of the variables																
Explanation of the lab test																
Desing of the practice guide																
Printing the 3D samples																
Test the 3D samples in the lab																
Write an exam for the students																
Finish the bibliography & annex																

Figura 1: Diagrama de Gantt. Fuente: Autor.

## 2.1 La impresión 3D

La impresión 3D, también conocida como manufactura por adición, es un proceso por el cual se crean objetos físicos colocando un material por capas en base a un modelo digital. Todos los procesos de impresión 3D requieren que el software, el hardware y los materiales trabajen en conjunto.

En la actualidad, las tecnologías de impresión 3D son variadas, y no hay ninguna tecnología estándar. Esto es debido a la juventud de la impresión 3D, que favorece que cada fabricante desarrolle su propia tecnología e intente imponerla de facto a la industria.

La principal diferencia entre las tecnologías se encuentra dada por cómo la impresora deposita las diferentes capas de material para crear la pieza.

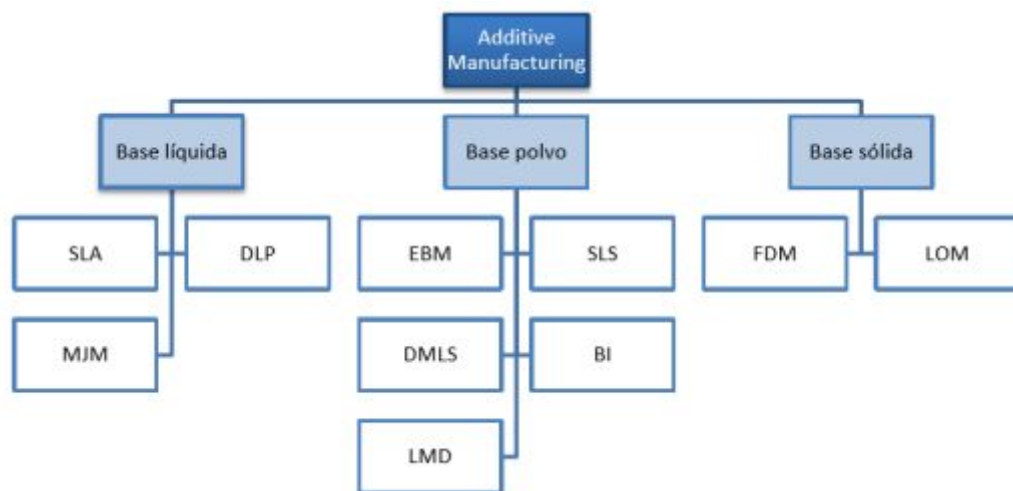


Figura 2. Esquema de la impresión 3D. [1]



## 2.2 Tecnologías de fabricación 3D

### 2.2.1 Base sólida

#### Fusion Deposition Modeling (FDM)

O *Tecnología de deposición de material plástico*, este metodo es utilizado con plasticos ABS o PLA.

Este modelado se realiza alimentado la impresora con un rollo de este material, el cual al pasar por el extrusor del equipo se calienta, derrite y es depositado capa a capa formando el objeto. Luego de ello se debe esperar a que el material se enfríe y pueda ser manipulado.

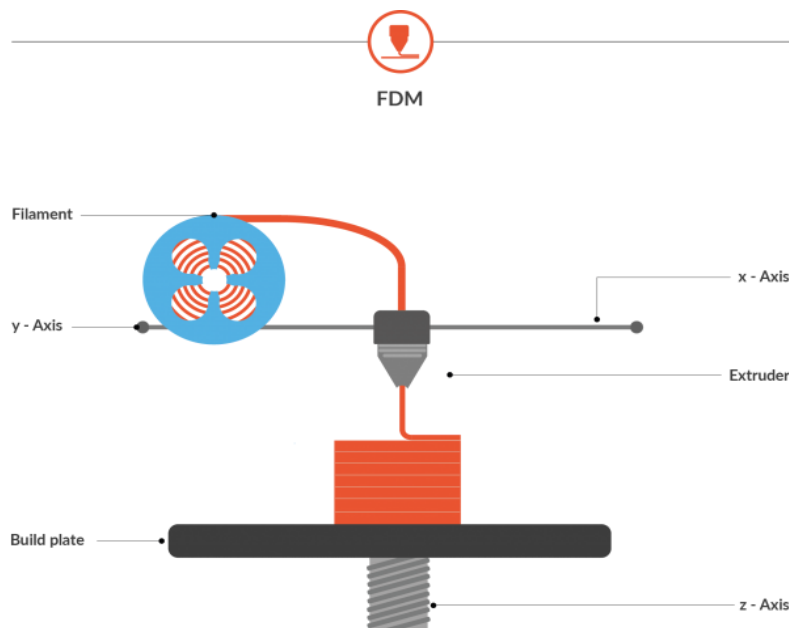


Figura 3: Impresión por FDM. [2]

### 2.2.2 Base líquida

#### Estereolitografía (SLA)

Esta tecnología se basa en el uso de un haz de láser, se moldea el objeto capa a capa, pero implica el uso de un baño de resina fotocurable. En este caso, el objeto moldeado con resina líquida se cura mediante el láser de luz ultravioleta.

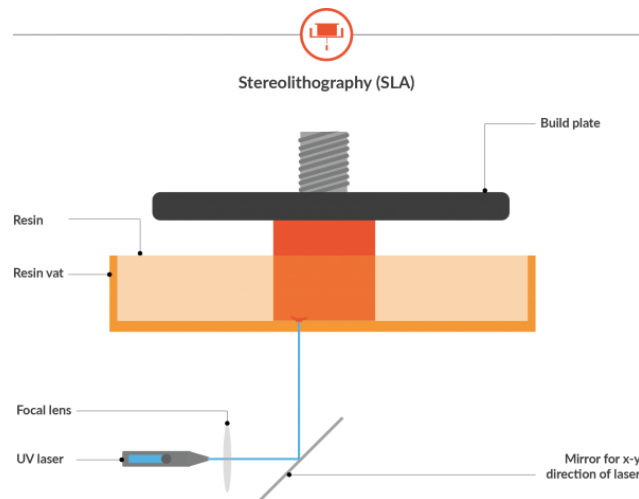


Figura 4: Impresión por SLA. [3]

### 2.2.3 Base polvo

#### Selective Laser Sintering (SLS)

O *Sinterización Selectiva Láser*, es similar a SLA, pero para el moldeado se pueden usar diversos insumos en polvo como materiales metálicos y cerámicos, nylon, entre otros. En este caso, el láser funde el material y lo solidifica.

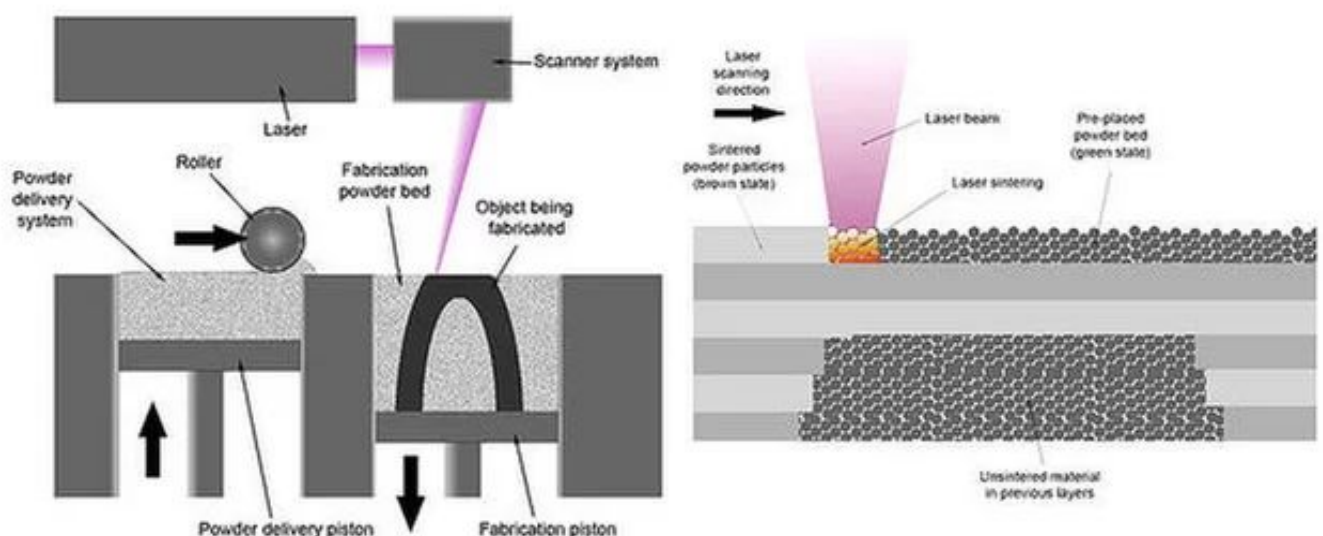


Figura 5: Impresión por SLS. [4]

## 2.3 Materiales

### 2.3.1 ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno es uno de los termoplásticos más usados en la impresión 3D. No es biodegradable, pero es muy tenaz, duro y rígido, con resistencia química y la abrasión, pero que sufre con la exposición a rayos UV. Es soluble en acetona y su densidad es de 1,05 g/cm<sup>3</sup>.

#### *PROPIEDADES DEL ABS*

- Dureza: Alta | Flexibilidad: media | Durabilidad: Alta
- Dificultad de uso: Media
- Temperatura de impresión 210 °C – 250 °C
- Temperatura de la cama de impresión 80 °C – 110 °C
- Contracción/deformación: Considerable
- Soluble: En ésteres, cetonas y acetona

### 2.3.2 PLA

El ácido poliláctico es otro de los filamentos más usados en la impresión 3D. Es biodegradable y normalmente se obtiene de almidón de maíz, por lo que al derretirse huele casi a comida y puede usarse para recipientes de comida.

La textura de las piezas no queda tan suave como con el ABS, pero sí más brillantes y las esquinas salen mejor. Su densidad es de entre 1,2 y 1,4 g/cm<sup>3</sup>.

#### *PROPIEDADES DEL PLA*

- Dureza: Alta | Flexibilidad: Baja | Durabilidad: Media
- Dificultad de uso: Baja
- Temperatura de impresión 180 °C – 230 °C

- Temperatura de la cama de impresión: 20 °C – 60 °C (aunque no necesaria)
- Contracción/deformación: Mínima
- Soluble: No

### 2.3.3 PETG

El tereftalato de polietileno es uno de los materiales más usados para las botellas y otro tipo de envases. Su principal propiedad es su capacidad de cristalización, generando piezas transparentes.

Es una variante del PET. La 'G' viene de "glicolizado" que hace que el filamento 3D sea más translúcido, y, sobre todo, más fácil de usar que el PET convencional. Es por esta razón que el PETG se ve a menudo como un término medio entre el ABS y el PLA. Es más flexible y duradero que el PLA y más fácil de extruir que el ABS.

#### *PROPIEDADES DEL PETG*

- Dureza: Alta | Flexibilidad: Media | Durabilidad: Alta
- Dificultad de uso: Baja
- Temperatura de impresión 220 °C – 250 °C
- Temperatura de la cama de impresión 50 °C – 75 °C
- Contracción/deformación: Mínima
- Soluble: No

### 2.3.4 NAILON

El nailon, una conocida familia de polímeros sintéticos utilizados por muchas industrias. En comparación con la mayoría de los filamentos para impresoras 3D, el nailon es el mejor en términos de dureza, flexibilidad y durabilidad.

#### *PROPIEDADES DEL NAILON*

- Dureza: Alta | Flexibilidad: Alta | Durabilidad: Alta
- Dificultad de uso: Media
- Temperatura de impresión 240 °C – 260 °C
- Temperatura de la cama de impresión 70 °C – 100 °C
- Contracción/deformación: Considerable
- Soluble: No

### 2.3.5 TPE

Los elastómeros termoplásticos (TPE) son esencialmente plásticos con propiedades elásticas, lo que los hace extremadamente flexibles y duraderos. Debido a esto, se encuentran en piezas de automóviles, electrodomésticos y equipos médicos.

#### *PROPIEDADES DEL TPE*

- Dureza: Media | Flexibilidad: Muy alta | Durabilidad: Muy alta
- Dificultad de uso: Media
- Temperatura de impresión 210 °C – 230 °C
- Temperatura de la cama de impresión: 30 °C – 60 °C (aunque no necesaria)
- Contracción/deformación: Mínima
- Soluble: No

### 2.3.6 POLICARBONATO

El policarbonato (PC), además de ser el filamento de mayor dureza, es extremadamente duradero y resistente a los golpes y al calor.

También es transparente y es por eso se utiliza para cristales a prueba de balas, máscaras de buceo y pantallas de dispositivos electrónicos.

#### PROPIEDADES DEL POLICARBONATO

- Dureza: Muy alta | Flexibilidad: Media | Durabilidad: Muy alta
- Dificultad de uso: Media
- Temperatura de impresión 270 °C – 310 °C
- Temperatura de la cama de impresión 90 °C – 110 °C
- Contracción/deformación: Considerable
- Soluble: No

## 2.4 Software

### 2.4.1 CURA

Cura es el programa de corte de referencia para todas las impresoras Ultimaker, pero también se puede usar con la mayoría de impresoras 3D. Es de código abierto y se le pueden añadir complementos.

La perfecta integración de CAD con productos como SolidWorks demuestra que el programa de corte 3D vale la pena para aplicaciones profesionales, pero también resulta simple y accesible para la gran mayoría de usuarios no profesionales.

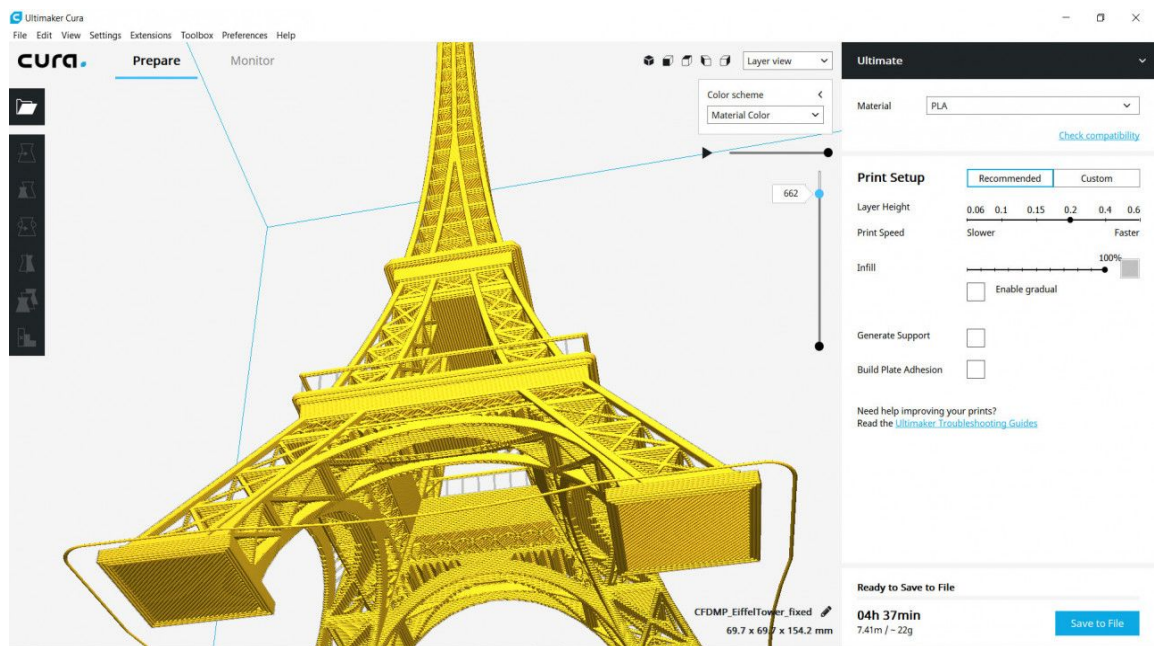


Figura 6: Software Cura. [5]

## 2.4.2 Slic3r

Slic3r es un programa de corte de código abierto conocido por añadir características de nivel avanzado que no se encuentran en otras herramientas.

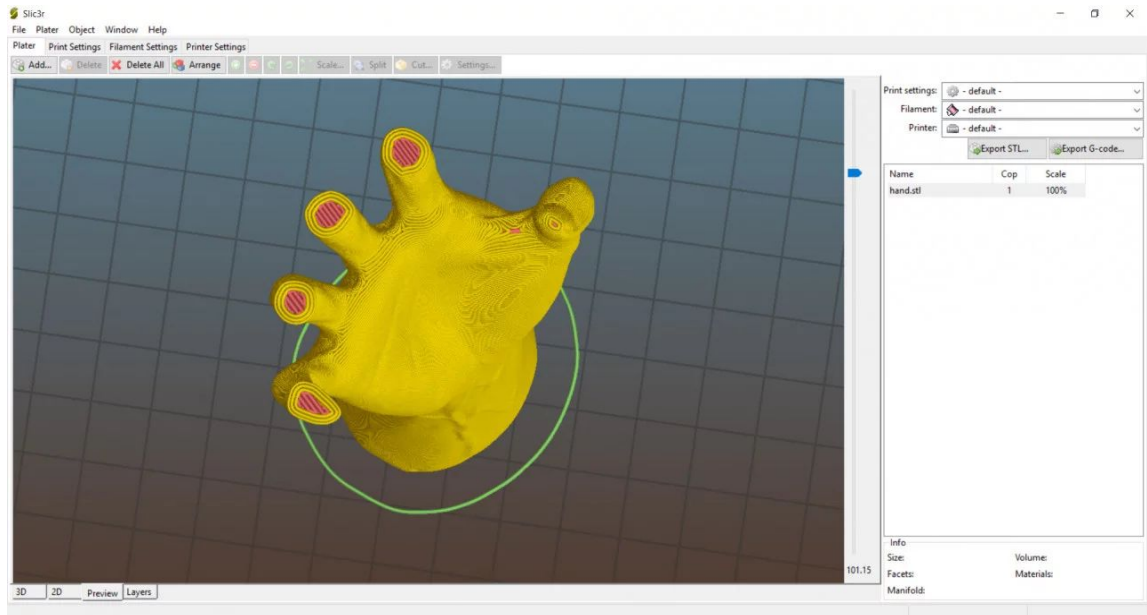


Figura 7: Software Slic3r. [6]



## 2.5 Campos de uso de la impresión 3D

### 2.5.1 Moda

El papel de la impresión 3D en la moda está en constante evolución, con un notable aumento en el conocimiento y el interés en la tecnología por parte de los diseñadores.

La impresión 3D permite a los diseñadores de moda expandirse más allá de los límites tradicionales del diseño, lo que les permite convertir en realidad algunos de los conceptos de diseño más desafiantes.

Sin la necesidad de un molde específico, los diseñadores son libres de crear geometrías y estructuras complejas, que no sólo son estéticamente agradables, sino que también pueden agregar funcionalidad inteligente.

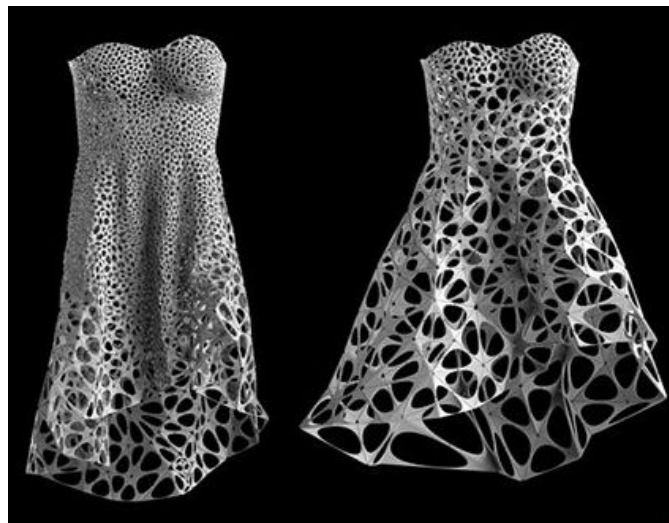


Figura 8: Impresión 3D en la industria de la moda. [7]

### 2.5.2 Deportes

La impresión en 3D ofrece muchas ventajas para los productos hechos a medida, desde mejorar las experiencias únicas de los consumidores hasta ahorrar tiempo y dinero durante el proceso de fabricación y diseño. El prototipado rápido de piezas también permite la personalización masiva de productos y reduce los desechos que

a menudo se crean a través de moldes de fabricación tradicional, lo que los convierte en una opción sostenible para los diseñadores.

Los zapatos creados con estos procesos son particularmente efectivos para adaptar los diseños de suela a las necesidades únicas de los usuarios, desde la forma y la comodidad hasta la marcha



Figura 9: Ejemplo suela impresión 3D. [8]

### 2.5.3 Alimentación



Figura 10: Imagen de pasta comestible con impresión 3D. [9]

El campo de la alimentación también está en proceso de expansión con la tecnología 3D. Un claro ejemplo es la empresa de pasta Barilla que desarrollaron una impresora para diseñar pasta. La impresora funciona con la tecnología FDM. Se utiliza una mezcla a base de agua y harina.

Otro caso sería la empresa de chocolate Hersheys junto con **3D Systems**, diseñaron la impresora 3D cocojet. Esta funciona con una técnica similar a la FDM, con la diferencia de que es capaz de trabajar con las diversas temperaturas que requiere el chocolate,

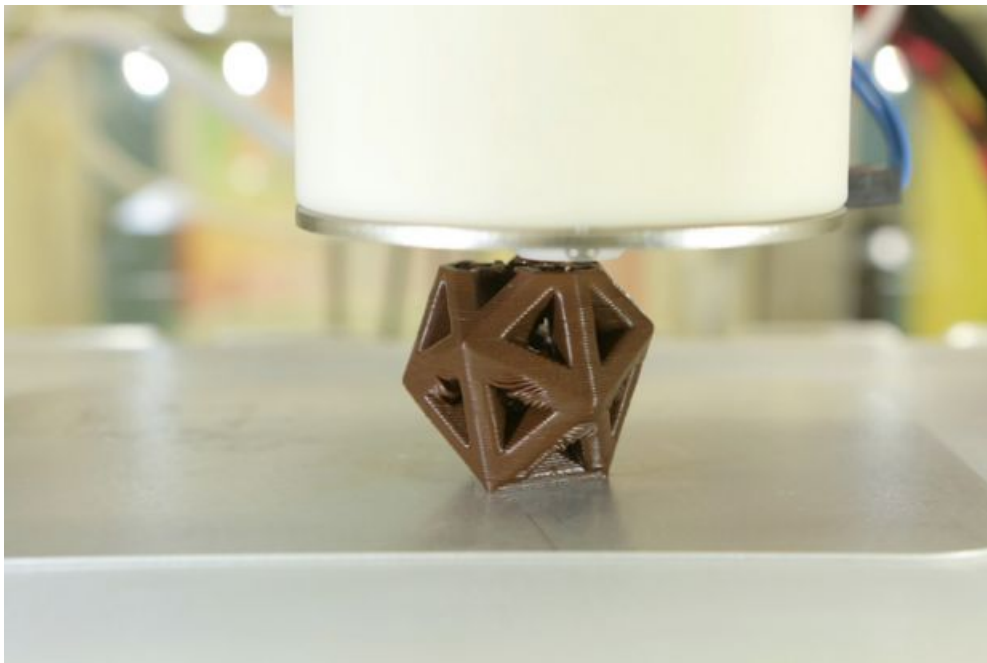


Figura 11: Impresora CocoJET. [10]

## 2.5.4 Medicina

De las aplicaciones de la impresión 3D, sin duda son las aplicaciones médicas las que más sorprenden y más avanzan día a día.

El sector de la odontología es uno de los que más utiliza la impresión 3D ya se realizan prótesis con software 3D para posteriormente ser impresos.



Figura 12: Prótesis dental con impresión 3D. [11]

Este campo abarca ámbitos tan espectaculares como el uso de la impresión para crear vasos sanguíneos.

El Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) ha descubierto un modo de imprimir vasos sanguíneos, usando azúcar como “tinta” en una impresora RepRap.

Los investigadores se centraron en la vascularización y diseñaron filamento 3D en un sistema vascular asentado en un molde, lo cual permite eliminar el molde y la plantilla una vez se desarrolla el tejido alrededor de los filamentos.

La fórmula utilizada, una combinación de sacarosa y glucosa con dextrano y refuerzo estructural.



Figura 13: Vasos sanguíneos con impresión 3D. [12]

### 3. Variables

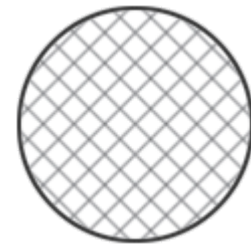
#### 3.1 Patrón de relleno

A la hora de realizar una impresión 3D es muy importante escoger el relleno que deseamos para la pieza. Este patrón hará que la pieza sea más o menos resistente y que tenga diferentes comportamientos respecto a otro patrón.

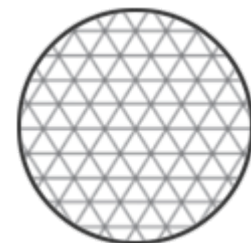
El patrón cuanto más complejo sea más material y tiempo de procesado requerirá.

Existen diferentes tipos de patrones como pueden ser:

•**Rectangular (rectilíneo):** Es el relleno estándar más utilizado que viene predefinido en el software de impresión. Ofrece una resistencia en todas las direcciones y se imprime relativamente rápido.



•**Triangular (diagonal):** Se utiliza cuando se requiere una buena resistencia en las paredes o cuando se quieren imprimir estructuras largas y delgadas. Este tipo de relleno requiere más tiempo de impresión que el rectangular.

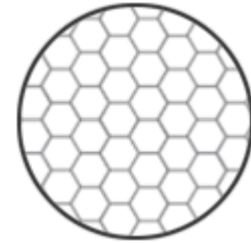


•**Ondulado (curvilíneo):** Este tipo de relleno es utilizado en piezas que necesiten ser blandas y flexibles, de forma que puedan retorcerse o comprimirse. Normalmente se utiliza en piezas impresas con materiales flexibles.





·**Panal de abeja (hexagonal):** Es un tipo de relleno muy utilizado cuando necesitamos piezas que ofrezcan muy buena resistencia en todas las direcciones.



Todas las figuras de patrón. [13]

Los patrones de relleno mencionados anteriormente son los más utilizados y comunes pero existe una gran variedad de patrones con diferentes formas en la industria.

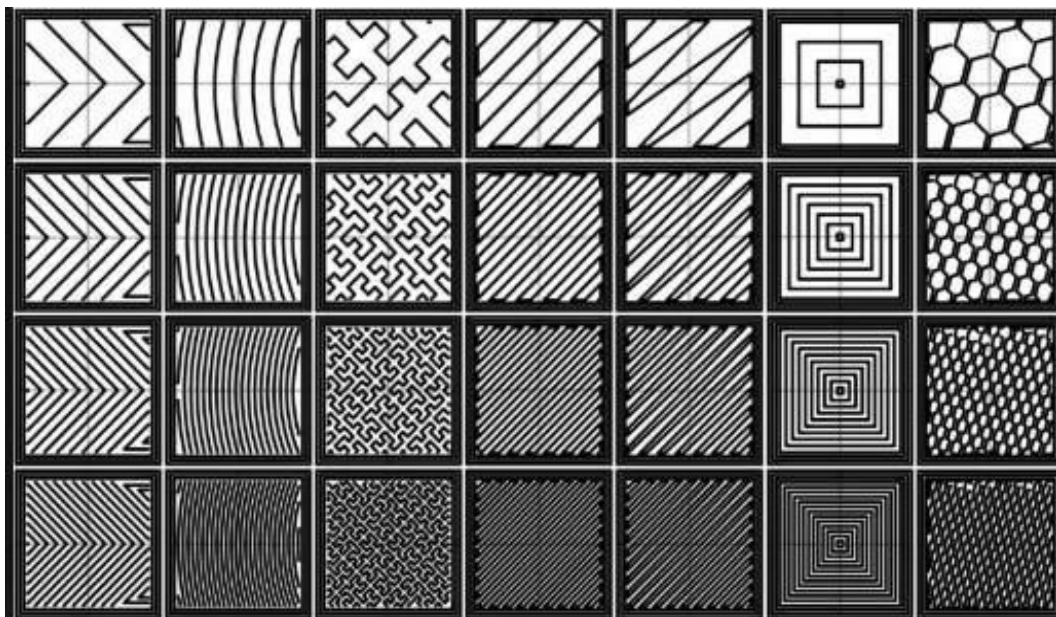


Figura 15: Otros patrones de relleno. [14]

### 3.2 Espesor de relleno/Altura de capa

La altura de capa es el grosor de cada capa. En función del acabado que se quiera dar a las piezas se debe aumentar o disminuir.

Cuanto más fino sea el espesor más suave será el relieve de la pieza.

Por lo general las impresoras FFF o FDM permiten imprimir desde 0,01 hasta 0,3 mm.

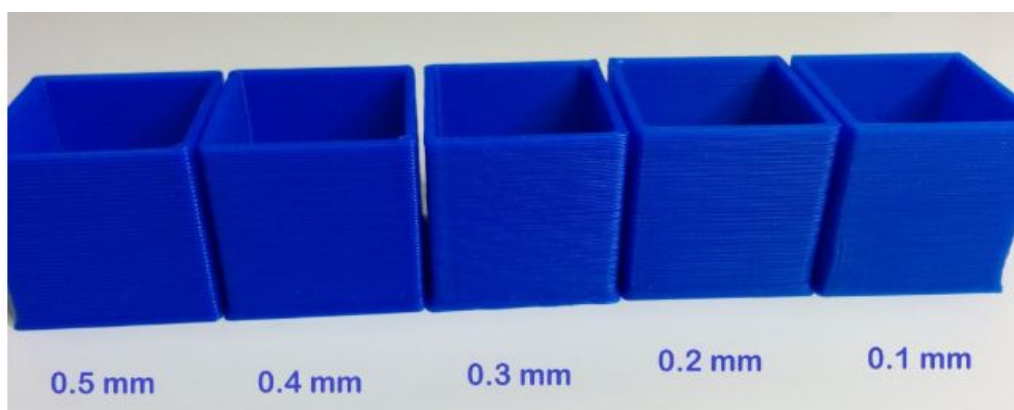


Figura 16: Espesor de relleno más comunes. [15]

### 3.3 Densidad de relleno

Cuanto mayor sea el porcentaje de relleno mayor será la resistencia de la pieza. Pero también serán mayores el peso, el tiempo de impresión y el coste (asociado a un mayor consumo de material) de la misma.

Existen valores orientativos de relleno en función de la funcionalidad de tu pieza:

**Piezas estéticas:** 10-20% de relleno y patrón rectilíneo

**Piezas genéricas:** 20-30% de relleno y patrón rectilíneo.

**Piezas grandes que vayan a resistir fuerzas mecánicas:** 40-50% de relleno y patrón Panal.

**Piezas pequeñas que vayan a resistir fuerzas mecánicas:** 100% de relleno y patrón rectilíneo (al 100% todos los patrones son similares).

Otra opción para aumentar la rigidez de una pieza es la impresión de capas sólidas entre el relleno, que cada ciertas capas se imprima una capa sólida intermedia.

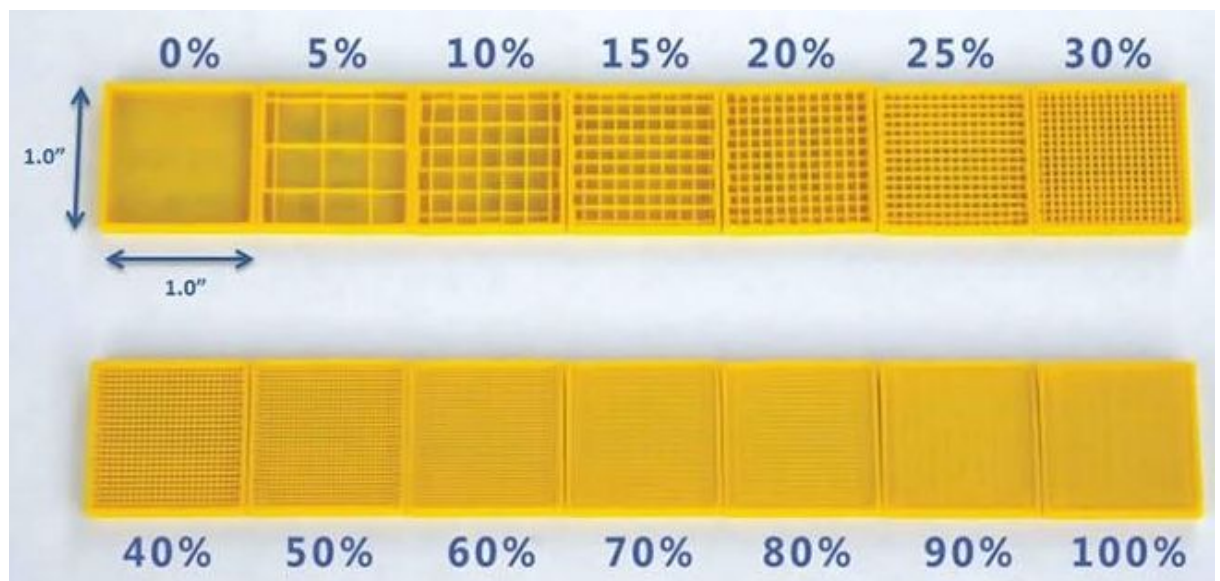


Figura 17: Rango de densidades de relleno. [16]



### 3.4 Forma de la probeta

Según el tipo de ensayo que se realice se debe elegir un tipo de probeta u otro.

***Para los ensayos destructivos:***

- Ensayo de compresión: Sección cilíndrica.
- Ensayo de flexión: Sección transversal circular o rectangular.
- Ensayo de tracción: Sección transversal circular o rectangular.
- Ensayo de torsión: Sección cilíndrica.

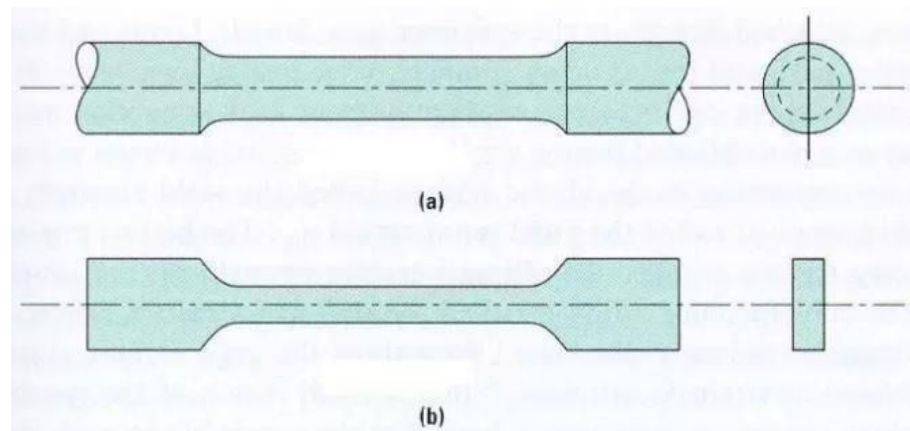


Figura 18: Forma de la probeta según el ensayo. [17]

*Los ensayos no destructivos no tienen restricciones geométricas para ser realizados.*

## **4. Ensayos a elegir**

### **4.1 Ensayos destructivos**

Se entiende por ensayos mecánicos, aquellos que pretenden medir la capacidad de un material para soportar esfuerzos de diferente tipo como la dureza, tracción, compresión, cizallamiento, flexión, torsión, entre otros.

#### **4.1.1 Ensayo a tracción**

En este ensayo se somete al material a una fuerza de tracción, es decir, se le aplica una fuerza o varias fuerzas externas que van a tratar de estirar el material. De hecho durante el ensayo se estira haciendo cada vez más fuerza sobre él hasta llegar a su rotura. Por lo tanto es un ensayo Esfuerzo-Deformación.

#### **4.1.2 Ensayo a compresión**

El ensayo de compresión se realiza para determinar las propiedades de un material frente a una sollicitación axial negativa. Sollicitación que pretende comprimir la probeta de ensayo.

#### **4.1.3 Ensayo a flexión**

El objetivo del ensayo de flexión es determinar las propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con los esfuerzos y flechas (deformaciones) en los puntos máximo y de rotura, y módulo elástico en flexión teniendo en cuenta la separación entre apoyos calculada a partir del espesor de la probeta.

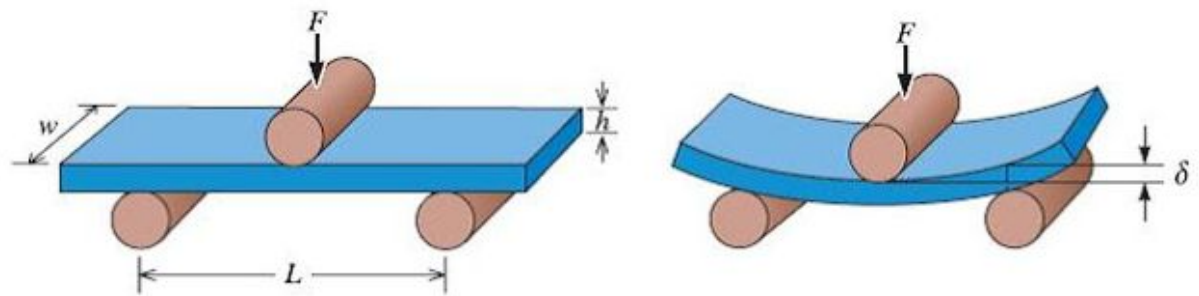


Figura 19: Ensayo a flexión. [18]

#### 4.1.4 Ensayo a torsión

La torsión en sí se refiere a un desplazamiento circular de una determinada sección transversal de un elemento cuando se aplica sobre éste un momento torsor o una fuerza que produce un momento torsor alrededor del eje.

El ensayo de torsión consiste en aplicar un par torsor a una probeta por medio de un dispositivo de carga y medir el ángulo de torsión resultante en el extremo de la probeta.

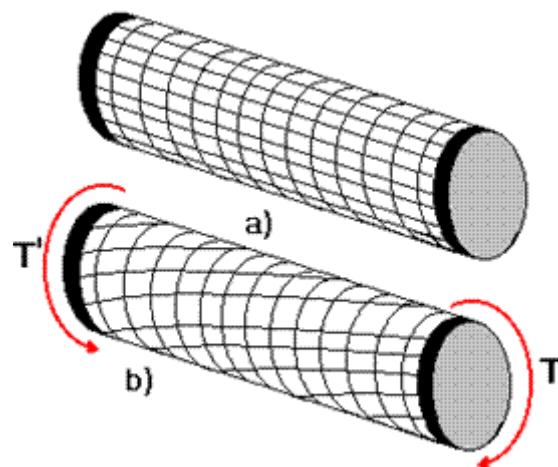


Figura 20: Ensayo a torsión. [19]

## 4.2 Ensayos NO destructivos

Tipo de ensayo en el cual implica un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

### 4.2.1 Ensayo a través de elementos finitos

Este tipo de ensayo realizado a través de computación permite estudiar el comportamiento de un objeto al aplicarle cargas mecánicas como estudios térmicos, eléctricos, etc.

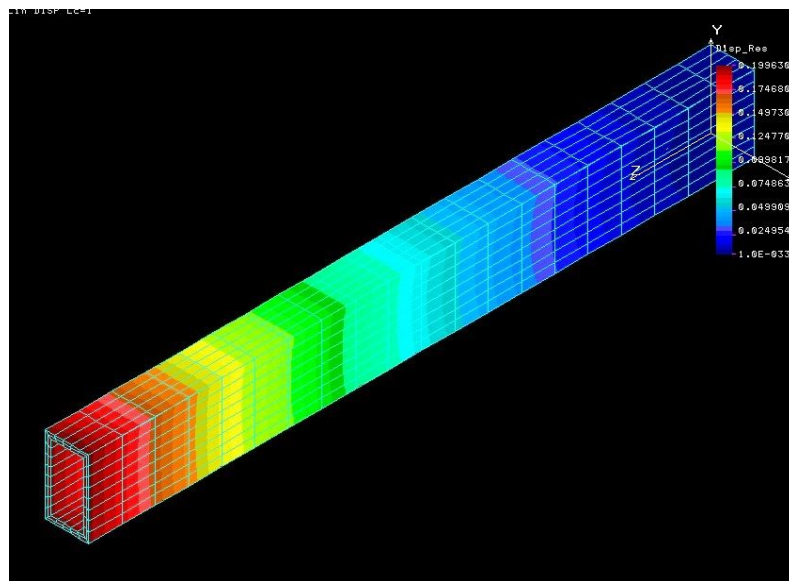


Figura 21: Ensayo a través de MEF. [20]

#### **4.2.2 Ensayo de deformación por extensometría eléctrica resistiva**

La extensometría es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la conductividad eléctrica de un material al aplicarle una descarga.

#### **4.2.3 Ensayo por flexión desviada**

Este tipo de ensayo se basa en someter un prisma mecánico a momentos flectores en los cuales la aplicación de la carga no coincide con el eje neutro del prisma.

## 5. Metodología y guía de la práctica

·Primero de todo el alumno debe partir del tipo de ensayo, ya que si decide realizar ensayo destructivo se elegirá un tipo de probeta u otro. Para los ensayos no destructivos no hay limitación de geometría a elegir.

·A continuación se elegirá el tipo de material con el cual se desea ensayar la pieza.

·Posteriormente se empezará a elegir según las variables que intervienen como la densidad, el espesor de capa i el patrón de relleno.

Patrón	Espesor	Densidad	Material
·Rectilíneo	·Fino	·10%	·ABS
·Diagonal	·Estandar	·30%	·PLA
·Curvilíneo	·Grueso	·50%	
·Hexagonal		·70%	
		·100%	

## 6. Software de impresión: Slic3r


Se usará el software Slic3r para la realización de la práctica.

Se debe configurar en función de la impresora que se disponga y el material.

### 6.1 Configuración inicial



En esta pestaña seleccionaremos el firmware que controla nuestra máquina.

 **Nota:** Por defecto las maquinas de RepRapBCN, tanto la PRUSA 3D como la BCN 3D llevan en los manuales como cargar el firmware **Marlin**.

### Bed Size

Enter the size of your printers bed, then click Next.

Bed size: x: 200 y: 200 mm

< Back Next > Cancel

**⚠ Nota:** Por defecto las maquinas de RepRapBCN, tanto la PRUSA 3D como la BCN 3D utilizan diferentes bases pero del mismo tamaño en x,y. Por defecto es de 200x200mm para ambas máquinas.

### Nozzle Diameter

Enter the diameter of your printers hot end nozzle, then click Next.

Nozzle diameter: 0.5 mm

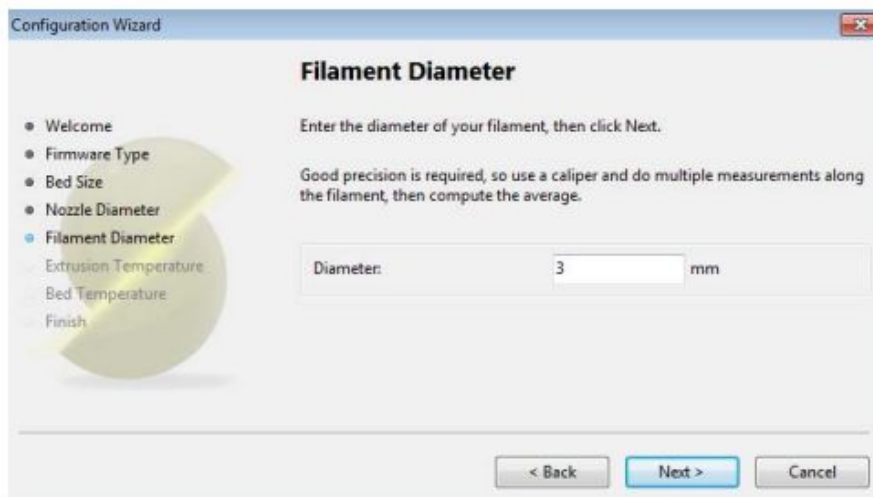
< Back Next > Cancel

**⚠ Nota:** El hotend V5 del Greg's Extruder de RepRapBCN es de 0,5mm de diámetro. Para más diámetros, mirar anexo 1.



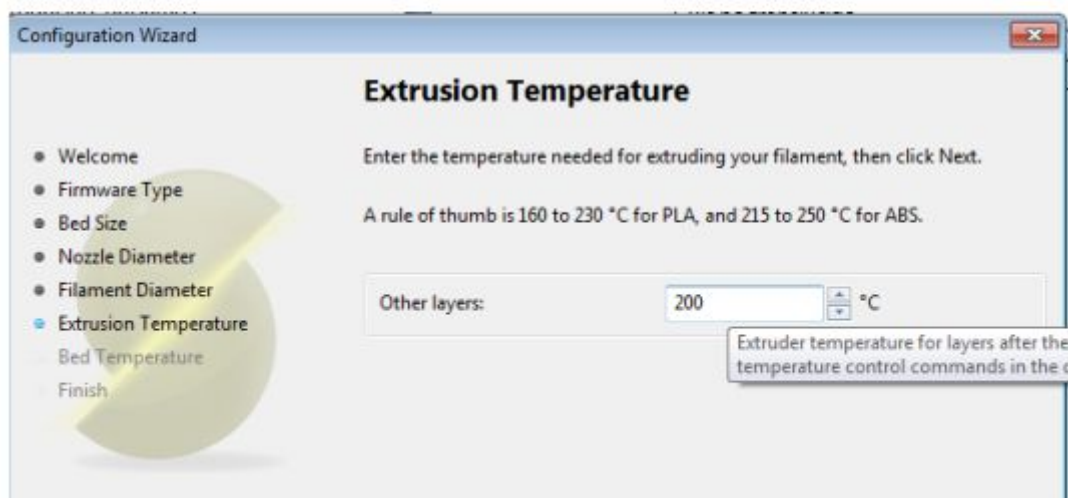
5. En este apartado debemos introducir el diámetro del hilo. Se recomienda medir el diámetro del mismo con un pie de rey para verificar el diámetro correctamente. Posteriormente pulsamos en Next.

**⚠ Truco:** Hemos descubierto que en nuestro material, la media del grosor del material de 3mm es de 2,93mm de diámetro. Si se está utilizando material de RepRapBCN se puede introducir 2,93mm sin ningún miedo.



En el apartado que viene a continuación se debe introducir la temperatura de la boquilla. Este parámetro puede diferir del material que utilizamos. A continuación una tabla resumen con los valores **orientativos**.

Material	Temperatura °C
Pla no translucido	190-195
Pla translucido	165
ABS	210-230



7. En la ventana siguiente aparece la configuración de la temperatura de la base.

A continuación mostramos una tabla resumen con los valores orientativos

Material	Temperatura °C
Pla no translucido	55-60 con kapton, 70 sin kapton
Pla translucido	55-60 con kapton, 70 sin kapton
ABS	90 con kapton, 110 sin kapton



Todas las figuras [22]: Manual Slic3r.

## 7. Hoja de la práctica

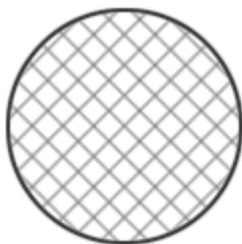
### Práctica de resistencia de materiales y teoría de estructuras

#### *Ensayo del comportamiento de piezas realizadas con impresión 3D*

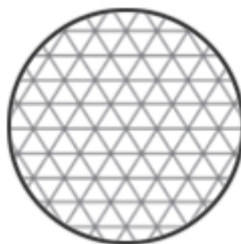
El objetivo principal de esta práctica es el diseño de diferentes piezas realizadas con impresión 3D a partir de diferentes configuraciones como densidad, espesor, material, etc. Para posteriormente ser ensayadas en el laboratorio y comparar cómo estas diferentes variables afectan al comportamiento de las piezas.

#### **Variables**

**Patrón:** Esta variable es la forma en la cual se rellena la pieza y hará que la pieza sea más o menos resistente y que tenga diferentes comportamientos respecto a otro patrón.



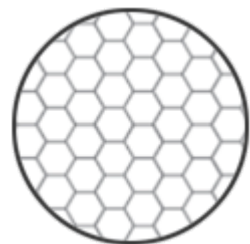
**P1: Rectilíneo**



**P2: Diagonal**



**P3: Curvilíneo**



**P4: Hexagonal**

**Espesor:** Cuanto más fino sea el espesor más suave será el relieve de la pieza pero más tardará en imprimirse.



**E1: Fino    E2: Estándar    E3: Grueso**

**Densidad:** Esta variable aporta solidez a la pieza, con la cual cosa a mayor densidad mayor será la rigidez de la pieza impresa.



**D1: 10%**

**D2 :30%**

**D3: 50%**

**D4: 70%**

**D5: 100%**

**Material:** La elección del material es muy importante para la impresión 3D, ya que según el tipo de material se obtendrán diferentes resultados al ensayar.

**PLA: M1**

**ABS: M2**

## Ensayos destructivos

Es importante tener en cuenta que en función de la forma que se desee de la probeta se realizará un ensayo u otro.

- Ensayo de compresión: Sección cilíndrica **(T1)**.
- Ensayo de flexión: Sección transversal circular o rectangular **(T2)**.
- Ensayo de tracción: Sección transversal circular o rectangular **(T3)**.
- Ensayo de torsión: Sección cilíndrica **(T4)**.

## Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos no tienen restricciones geométricas para ser realizados.

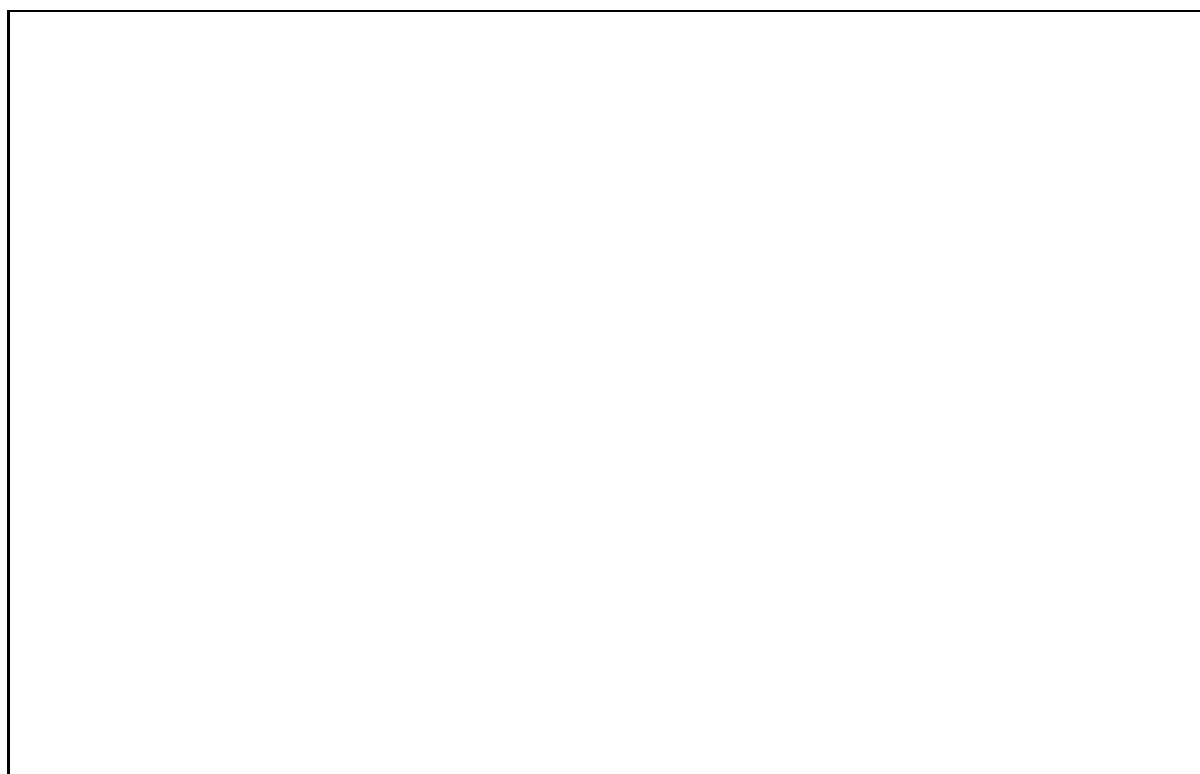
- Ensayo por elementos finitos **(T5)**.
- Ensayo por flexión desviada **(T6)**.

Nombre y Apellidos	
Curso	
Grupo	

### Elección de las variables

Patrón	Espesor	Densidad	Material	Ensayo
P1	E1	D1	M1	T1
P2		D2		T2
P3	E2	D3		M2
		D4	T4	
P4	E3	D5	T5	
			T6	

### Fotos de las probetas impresas



**Resultados de los ensayos que se realicen.**

**Conclusiones y propuestas de mejora.**

*Exponer las conclusiones propias y alguna propuesta de mejora para futuras prácticas de cursos futuros.*

## 8. Hoja de la práctica: Prueba piloto

*Se realiza una prueba piloto para ejemplificar la resolución de la práctica desde la elección de las variables hasta la realización de los ensayos.*

Nombre y Apellidos	Moises Pérez Wic
Curso	-
Grupo	-

Patrón	Espesor	Densidad	Material	Ensayo
P1	E1	D1	M1	T1
P2		D2		T2
P3	E2	D3		T3
		D4	M2	T4
P4	E3	D5		T5
				T6

### Ensayos realizados

#### Elementos finitos (MEF)

El objetivo es modelizar y analizar el comportamiento la probeta seleccionada anteriormente mediante elementos finitos.

La probeta trabajará como una ménsula (empotrada en uno de sus extremos y en el otro extremo una carga aplicada).



La carga utilizada es de  $P=5N$ .

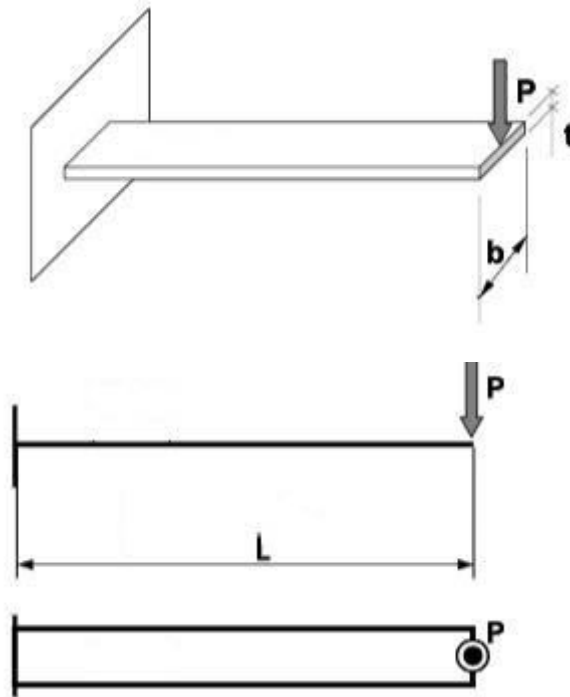


Figura 23: Ensayo a tres puntos.

fotos sacadas manual practica de resistencia, citar bibliografia

Dónde:

P: Carga aplicada

b: Ancho de la probeta

t: Espesor de la probeta

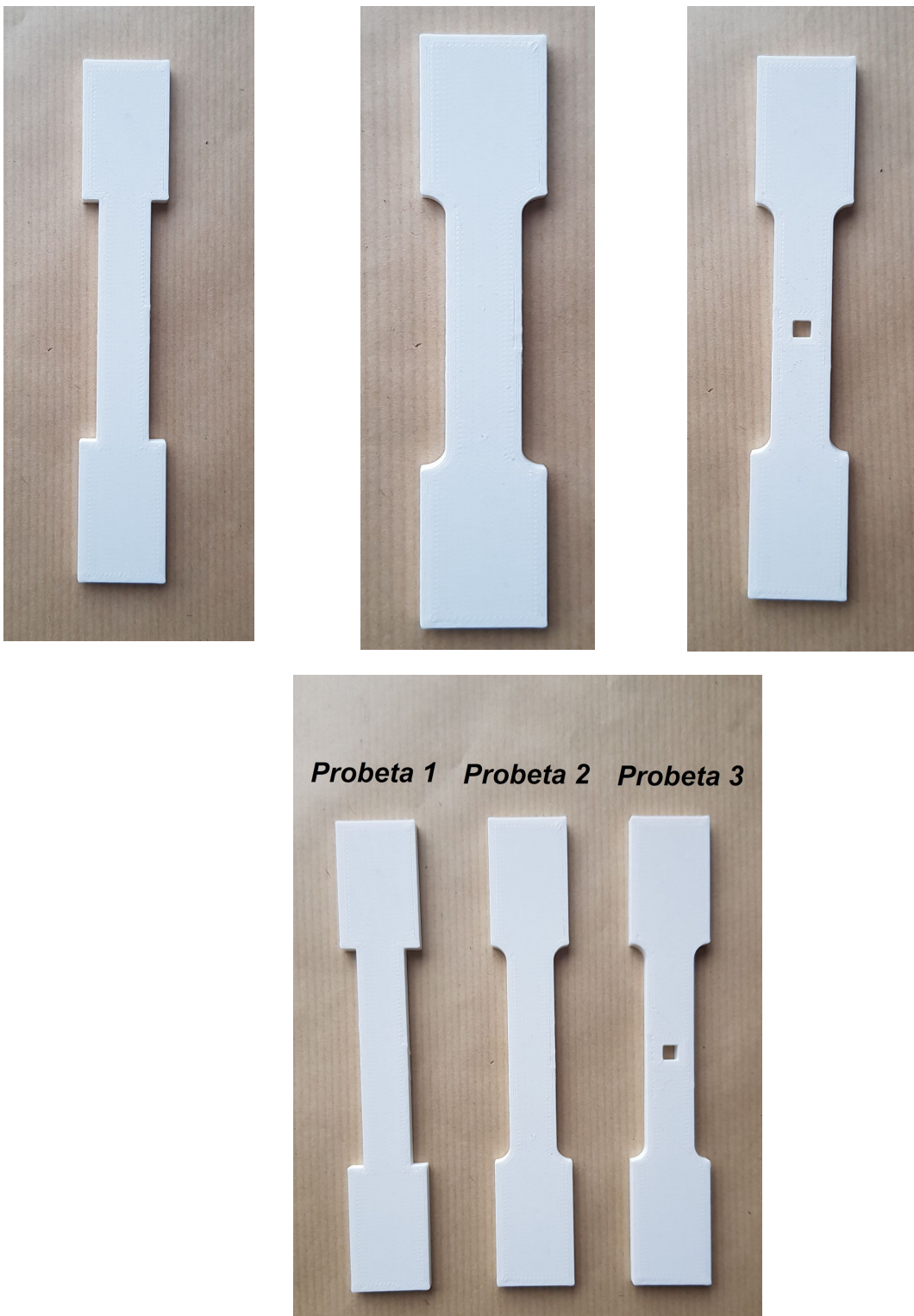
L: Longitud de la probeta

A partir del ensayo se debe obtener:

· Tensión de Von Mises

· Calcular la flecha (desplazamiento en Z) en el punto de apoyo de la carga P.

## Probetas de PLA



Figuras: Probetas PLA. Fuente: Autor

## Ensayo N°1

- Probeta #2 ABS

### Resultados

Definition				
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Strain Energy
Results				
Minimum	0, m	4,1615e-006 m/m	3464,5 Pa	1,1497e-009 J
Maximum	1,1179e-002 m	4,6345e-003 m/m	1,1074e+007 Pa	2,9257e-005 J
Average	4,2009e-003 m	1,0713e-003 m/m	2,5452e+006 Pa	

Fuente: Autor

### Flecha en Z

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	1,1179e-002	4,2009e-003

Fuente: Autor

## Ensayo N°2

- Probeta #3 ABS

### Resultados

Definition				
Type	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Strain Energy	Total Deformation
Results				
Minimum	3,1286e-006 m/m	2870, Pa	1,3212e-009 J	0, m

Maximum	5,3133e-003 m/m	1,2001e+007 Pa	3,3294e-005 J	1,1533e-002 m
Average	1,1143e-003 m/m	2,6404e+006 Pa		4,1744e-003 m

Fuente: Autor

### **Flecha en Z**

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	1,1533e-002	4,1744e-003

Fuente: Autor

## Ensayo N°3

- Probeta #2 PLA

### **Resultados**

Definition				
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Strain Energy
Results				
Minimum	0, m	3,9508e-006 m/m	744,96 Pa	8,3914e-010 J
Maximum	7,6585e-003 m	3,1504e-003 m/m	1,1024e+007 Pa	2,0889e-005 J
Average	2,8419e-003 m	7,3501e-004 m/m	2,5574e+006 Pa	

Fuente: Autor

### **Flecha en Z**

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	7,6585e-003	2,8419e-003

Fuente: Autor

## Ensayo a tracción

Se pretende obtener la gráfica entre tensión (fuerza aplicada/sección de la probeta) y deformación unitaria longitudinal (deformación/longitud inicial).

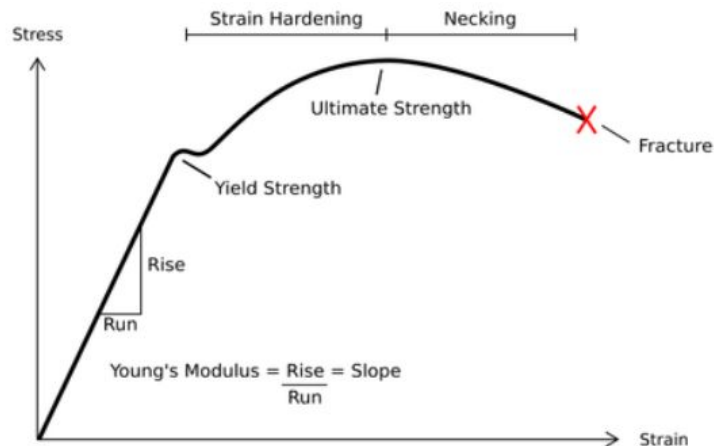


Figura [24]: Gráfico de tracción.

Con esta gráfica y la ecuación de la ley de hooke se obtiene el módulo de young.

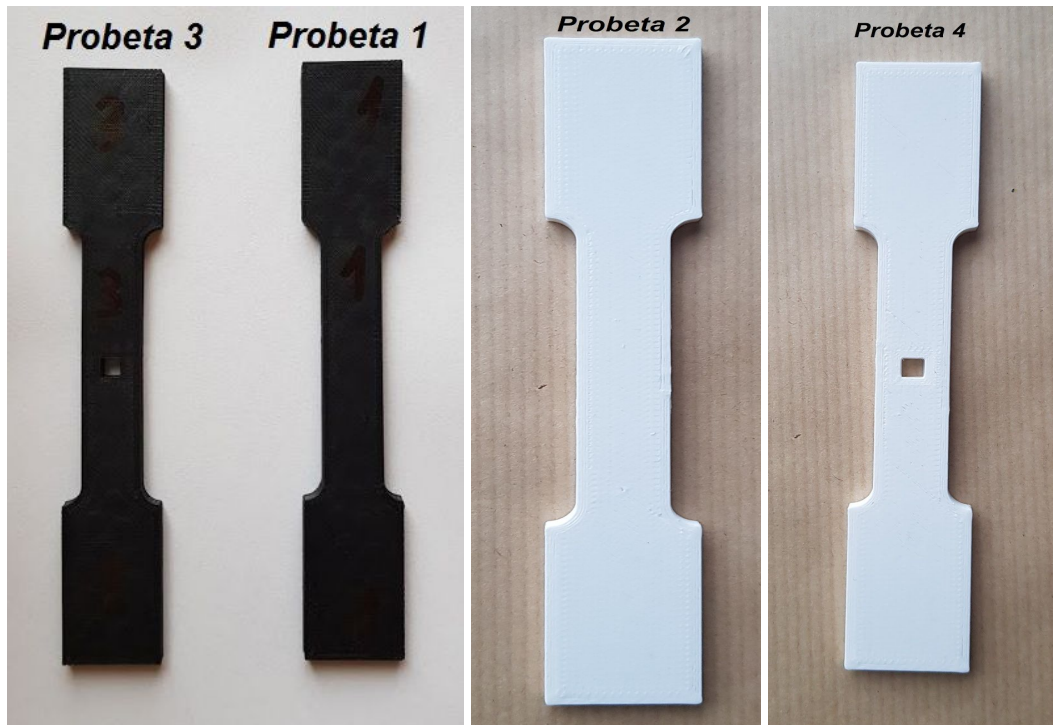
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L},$$

Donde:

E: És el módulo de elasticidad (módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young).

$\sigma$ : És la tensión ejercida sobre el área de la sección transversal.

$\epsilon$ : És la deformación unitaria.



Figuras: Probetas ABS y PLA antes de ensayar. Fuente: Autor.



Figuras: Probetas ABS y PLA después de ensayar. Fuente: Autor.



## Probeta 1: ABS

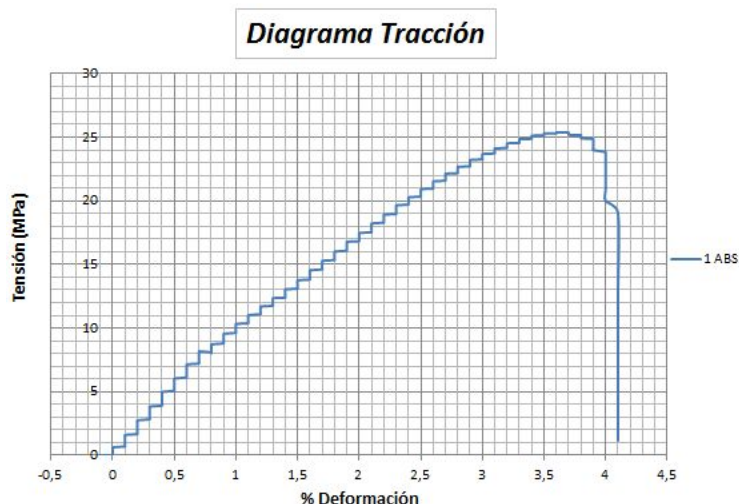


Diagrama de tracción probeta 1. Fuente: Autor.

Para encontrar el módulo de young se escoge cualquier punto la curva ya que el comportamiento es lineal casi en el total de la extensión de la curva.

Carga (N)	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Tensión (MPa)	Deformación (mm/mm)	% Deformación (mm/mm)
65,099	152,43	0,102	1,614	0,001	0,1

$$E = \frac{\text{Tensión } \sigma \text{ (MPa)}}{\text{Deformación unitaria } \epsilon \text{ (mm/mm)}} = \frac{1,614}{0,001} = 1614 \text{ MPa}$$

Se obtiene un módulo de young de 1614 MPa, y sabiendo que la  $E$  para ABS de impresión está entre 1.5 y 2.5 MPa podemos ver como es un valor coherente.

## Probeta 2: PLA

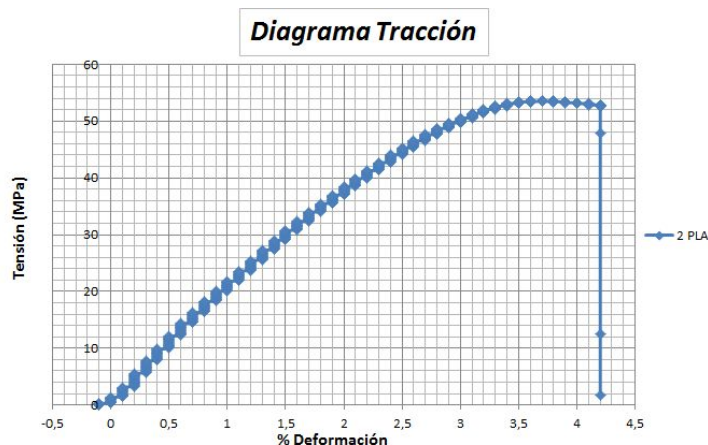


Diagrama de tracción probeta 2. Fuente: Autor.

Carga (N)	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Tensión (MPa)	Deformación (mm/mm)	% Deformación (mm/mm)
215,247	310,24	0,17	5,338	0,002	0,2

$$E = \frac{Tensió\sigma \text{ (MPa)}}{Deformaci\acute{o}n unitaria \epsilon \text{ (mm/mm)}} = \frac{5,338}{0,002} = 2669 \text{ MPa}$$

Se obtiene un m\u00f3dulo de young de 2669 MPa, y sabiendo que la  $E$  para PLA de impresi\u00f3n est\u00e1 entre 2.5 y 3.5 MPa podemos ver como es un valor coherente.

### Probeta 3: ABS

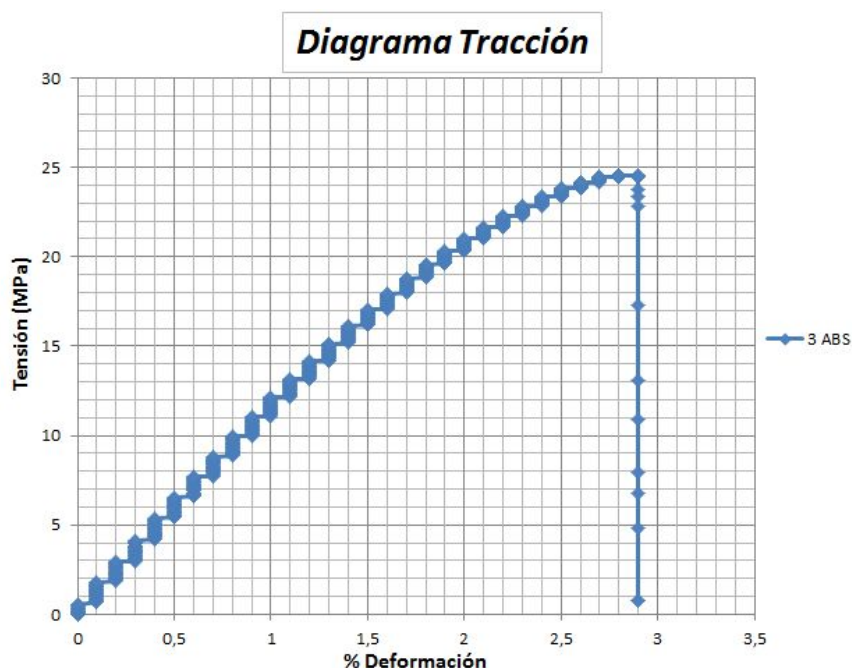


Diagrama de tracci\u00f3n probeta 3. Fuente: Autor.

Carga (N)	Tiempo (s)	Extensi\u00f3n (mm)	Tensi\u00f3n (MPa)	Deformaci\u00f3n (mm/mm)	% Deformaci\u00f3n (mm/mm)
71,849	419,88	0,103	1,782	0,001	0,1

$$E = \frac{Tensió\sigma \text{ (MPa)}}{Deformaci\acute{o}n unitaria \epsilon \text{ (mm/mm)}} = \frac{1,782}{0,001} = 1782 \text{ MPa}$$



## Probeta 4: PLA

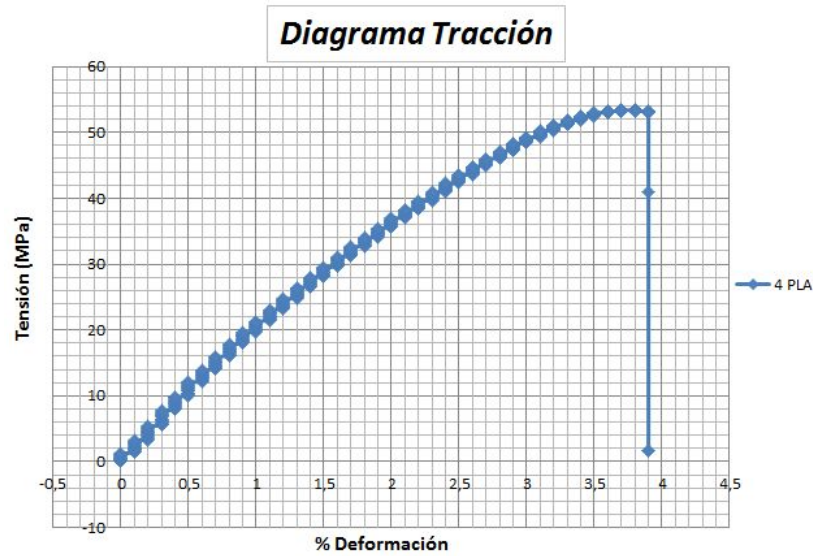


Diagrama de tracción probeta 4. Fuente: Autor.

Carga (N)	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Tensión (MPa)	Deformación (mm/mm)	% Deformación (mm/mm)
368,063	538,64	0,287	9,128	0,004	0,4

$$E = \frac{\text{Tensión } \sigma \text{ (MPa)}}{\text{Deformación unitaria } \epsilon \text{ (mm/mm)}} = \frac{9,128}{0,004} = 2282 \text{ MPa}$$

## Diagrama de todas las probetas

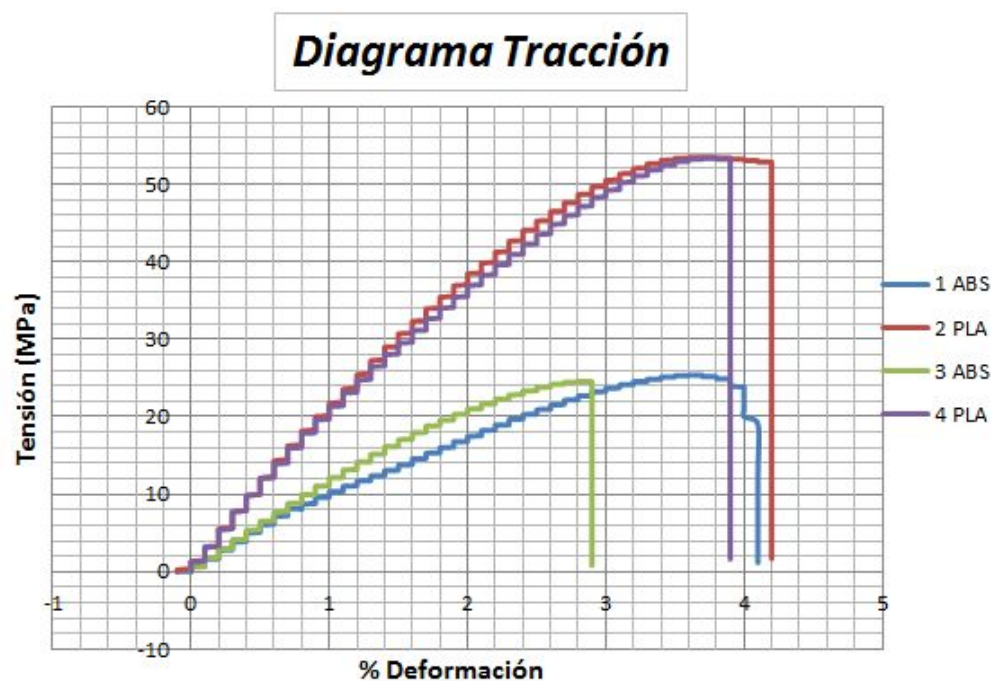


Diagrama de tracción de todas las probetas confrontadas. Fuente: Autor.

## **Conclusiones ensayos**

Con los ensayos de tracción podemos ver que las probetas 3 y 4 rompen por la zona donde tienen una alteración de la estructura ya que son las zona de menor espesor.

Como era de esperar el límite elástico obtenido por ensayo en las probetas de PLA es mayor a las de ABS.

Al realizar el ensayo de elementos finitos podemos observar como la probeta de ABS tiene un mayor desplazamiento en Z que la probeta de PLA.

Este hecho es lógico ya que el ABS tiene un módulo de Young inferior al del PLA con la cual cosa el ABS es un material más deformable.

## 9. Test de conocimientos

*Test de conocimientos básicos para comprobar que el alumno ha comprendido algunos conceptos básicos sobre la impresión 3D.*

1.- Sabiendo que el ABS tiene una  $T_g$  (temperatura de transición vítrea) de  $104^{\circ}\text{C}$  y el PLA de  $57^{\circ}\text{C}$ , ¿cuál de ellos será más complicado de imprimir?

**R: El ABS.**

2.- Sabiendo que el ABS tiene un módulo de Young entre 1.5 y 2.5 MPa y el PLA entre 2.5 y 3.5 MPa, ¿cual de ellos sufrirá un mayor alargamiento mediante ensayo?

**R: El ABS.**

3.- ¿En qué consiste el proceso de impresión 3D por depósito de filamento fundido o FDM?

**R: El modelado por deposición fundida utiliza una técnica aditiva, depositando el material en capas, para conformar la pieza. Un filamento plástico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla (esta se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material).**

4.- ¿Por qué es necesario el uso de una cama caliente para la impresión de según qué materiales?

**R: Una de las razones es que por ejemplo el ABS la necesita ya que si no se producirían grietas y deformaciones.**

## 10. Presupuesto

DISEÑO DEL PROYECTO		HORAS MANO OBRA	COSTO MANO OBRA (€)	COSTO MATERIAL (€)	TOTAL POR TAREA
TAREAS DEL PROYECTO					
Búsqueda información		100,0	15,00 €	0,00 €	1.500,00 €
Tutorías de desarrollo		2,0	15,00 €	0,00 €	30,00 €
Subtotal		102,0	30,00 €	0,00 €	1.530,00 €
DESARROLLO DEL PROYECTO					
Redactado memoria		300,0	15,00 €	0,00 €	4.500,00 €
Diseño probetas		3,0	15,00 €	0,00 €	45,00 €
Impresora 3D		0,0	0,00 €	200,00 €	200,00 €
Bobinas de PLA y ABS		0,0	0,00 €	30,00 €	30,00 €
Realizar ensayos en laboratorio		1,0	300,00 €	0,00 €	300,00 €
Subtotal		304,0	330,00 €	230,00 €	5.075,00 €
ENTREGA DEL PROYECTO					
Impresión del proyecto y encuadernado		0,5	0,00 €	15,00 €	15,50 €
Preparación exposición		50,0	15,00 €	0,00 €	65,00 €
Subtotal		50,5	15,00 €	15,00 €	80,50 €
Subtotales		456,5	375,00 €	245,00 €	6.665,50 €
Factor seguridad 1,3		137,0	112,50 €	73,50 €	2.005,65 €
Total		593,5	487,50 €	318,50 €	8.691,15 €

Figura: Presupuesto proyecto. Fuente: Autor.

## 11. Pliego de condiciones

### 11.1 Ensayos de tracción para materiales plásticos

Determinación de las propiedades en tracción (ISO 527 - 1:2012)

Los métodos son selectivamente adecuados para su uso con los siguientes materiales:

- Materiales termoplásticos moldeados, extruidos y moldeados, extruidos y semirrígidos (véanse los apartados 3.12 y 3.13, respectivamente), incluidos los compuestos rellenos y reforzados, además de los tipos sin relleno; láminas y películas termoplásticas rígidas y semirrígidas;
- Materiales de moldeo termoestables rígidos y semirrígidos, incluidos los compuestos rellenos y reforzados; Láminas termoestables rígidas y semirrígidas, incluidos los laminados;
- Termoestables reforzados con fibra y compuestos termoplásticos que incorporan refuerzos unidireccionales o no unidireccionales, como alfombras, tejidos, mechas tejidas, hilos cortados, refuerzos combinados e híbridos, mechas y fibras fresadas; hoja hecha de materiales preimpregnados (prepregs),
- Polímeros termotrópicos de cristal líquido.

La velocidad para la determinación del módulo se establecerá de manera que se alcance una tasa de deformación del 1% / min.

utilizando una de las velocidades de la tabla 1 en ISO 527 parte 1.

Test speed $v$ mm/min	Tolerance %
0,125	±20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	
20	±10
50	
100	
200	
300	
500	

Figura [25]: Tabla de velocidades recomendadas.

## **12. Conclusiones globales**

El objetivo principal de este proyecto ha consistido en elaborar una guía de como realizar componentes en 3D para posteriormente ser ensayados en laboratorio de las asignaturas del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería.

Las fases de la guía para el alumno consiste en; diseñar las piezas, imprimirlas con tecnología 3D, elegir las variables a estudiar, definir los ensayos, elaborar guía práctica y el informe resultados.

Obviamente el ámbito de la impresión 3D es muy extenso, pero con esta guía de impresión el alumno empieza a entender las variables de impresión y cómo estas influyen en los resultados finales en laboratorio, como se ha comprobado con la realización de este proyecto.

### **13. Líneas futuras**

·Añadir otros ensayos como podrían ser de ultrasonidos, térmicos, líquidos penetrantes, radiografías, tomografía, etc.

·Añadir más materiales como PET, Nylon, PC, etc. Para así poder ver como las propiedades varían según el tipo de material.

·Variar otro parámetro de impresión como podría ser la velocidad, ya que probablemente la velocidad influya en las propiedades finales de las probetas.



## **14. Agradecimientos**

No podía dar por terminado este proyecto final de grado sin agradecer a mi familia y amigos por estos 4 años de apoyo y por las ideas que me han dado para poder realizar este proyecto.

También agradecer a mi directora Montserrat Sánchez por guiarme en la realización, a Rafael Weyler por la impresión de las probetas y a José Ignacio Velasco por los ensayos mecánicos.

En definitiva, muchas gracias a todas las personas que han hecho posible la realización de este proyecto final de grado.

## 15. Bibliografía

### ***Figuras***

- [1] Impresoras 3D ¿Qué son? ¿Cómo funcionan? Todo sobre impresión 3D - Tecnología & Informática. Tecnología & Informática. <https://tecnologia-informatica.com/impresoras-3d-que-son-como-funcionan-impresion-3d/>. Published 2019. Accessed March 1, 2019.
- [2] Fused Deposition Modelling (FDM) ~ DruckWege. DruckWege. <https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>. Published 2019. Accessed April 6, 2019.
- [3] Stereolithographie (SLA) ~ DruckWege. DruckWege. <https://druckwege.de/en/home-en/technology/stereolithographie-sla>. Published 2019. Accessed April 6, 2019.
- [4] Sinterizado selectivo por láser. Es.wikipedia.org. [https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado\\_selectivo\\_por\\_l%C3%A1ser](https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser). Published 2019. Accessed March 6, 2019.
- [5],[6] Los 27 mejores programas para impresoras 3D gratuitos de 2019 | All3DP. All3DP. <https://all3dp.com/es/1/programas-software-impresora-3d-printer-software-3d-gratis/>. Published 2019. Accessed March 3, 2019.
- [7] Moda impresa en 3D - El estado del arte en 2019 - impresoras3d.com. impresoras3d.com. <https://www.impresoras3d.com/moda-impresa-en-3d-el-estado-del-arte-en-2019/>. Published 2019. Accessed February 14, 2019.
- [8] Adidas Release their 3D Printed Shoes: The Futurecraft 4D - 3Dnatives. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/en/adidas-futurecraft-4d-220120184/>. Published 2019. Accessed February 14, 2019.
- [9] Impresoras 3D de comida, comida impresa y accesorios 3D en tu cocina - 3Dnatives. 3Dnatives.

- <https://www.3dnatives.com/es/comida-impresa-en-3d-cocina-3d-210520182/>  
. Published 2019. Accessed February 14, 2019.
- [10] Hersheys y 3Dsystems imprimen en 3D chocolate - 3Dnatives. 3Dnatives.  
<https://www.3dnatives.com/es/hersheys-y-3dsystems-imprimen-en-3d-chocolate-01102015/>. Published 2019. Accessed April 6, 2019.
- [11] Piqueras F. Impresión 3D aplicada a odontología “Paso a Paso”. La mejor información sobre Impresión 3D.  
<https://impresiontresde.com/impresion-3d-aplicada-a-odontologia-paso-a-paso/>. Published 2019. Accessed February 4, 2019.
- [12] Bejerano P, Bejerano P, Bejerano P. La impresión 3D logra reproducir vasos sanguíneos artificiales. Blogthinkbig.com.  
<https://blogthinkbig.com/desarrollan-tecnica-imitar-vasos-sanguineos-media-n-te-impresion-3d>. Published 2019. Accessed March 18, 2019.
- [13] Cómo elegir el relleno más adecuado para tus impresiones 3D - TRIESFERA. TRIESFERA.  
<https://www.triesfera.com/como-elegir-relleno-impresion-3d/>. Published 2019. Accessed April 6, 2019.
- [14] Infill o Relleno - Curso de Impresoras 3D Valencia. Curso de Impresoras 3D Valencia.  
<https://www.cursoimpresion3d.es/online/configuracion/slic3r/parametros-impresion/infill-o-relleno/>. Published 2019. Accessed April 11, 2019.
- [15] Altura de capa Impresoras 3d. Impresoras 3D Granada | Createc 3D.  
<https://createc3d.com/altura-de-capa/>. Published 2019. Accessed April 6, 2019.
- [16] Blog - Chile - 3DWorks. 3DWorks.  
<https://www.3dworks.cl/blog/porcentaje-de-relleno-en-impresi%C3%B3n-3d>. Published 2019. Accessed April 6, 2019.

- [17] Probetas. Ensayos de materiales.  
<https://lsaratxaga.wordpress.com/ensayo-de-traccion/probetas/>. Published 2019. Accessed April 8, 2019.
- [18] Ensayo de flexión. Mecatronica-ipn-s1.blogspot.com.  
<http://mecatronica-ipn-s1.blogspot.com/2015/08/ensayo-de-flexion.html>. Published 2019. Accessed April 2, 2019.
- [19] Julio Mendoza M. Ensayo de torsión en metales (página 2) - Monografias.com. Monografias.com.  
<https://www.monografias.com/trabajos59/torsion-metales/torsion-metales2.shtml>. Published 2019. Accessed March 18, 2019.
- [20] MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) CON COSMOS Y PATRAN-NASTRAN. Proyectos Iñigo Aramendia.  
<https://inigoaramendia.wordpress.com/2015/01/27/metodo-de-elementos-finitos-mef-con-cosmos-y-patran-nastran/>. Published 2019. Accessed March 17, 2019.
- [21] Edu.xunta.gal. (2019). [online] Available at:  
[https://www.edu.xunta.gal/centros/cfrourense/aulavirtual2/pluginfile.php/10855/mod\\_resource/content/1/manual-slic3r.pdf](https://www.edu.xunta.gal/centros/cfrourense/aulavirtual2/pluginfile.php/10855/mod_resource/content/1/manual-slic3r.pdf) [Accessed 10 May 2019].
- [22] PRÁCTICA DE ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) DE UN COMPONENTE ESTRUCTURAL. (2019). .
- [23] Topics, O. and Topics, O. (2019). *Hooke's Law and plastic materials*. [online] Physics Forums | Science Articles, Homework Help, Discussion. Available at:  
<https://www.physicsforums.com/threads/hookes-law-and-plastic-materials.851527/> [Accessed 10 May 2019].
- [24] Upcommons.upc.edu. (2019). [online] Available at:  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8943/MemoriaPFC\\_Elementos\\_Finitos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8943/MemoriaPFC_Elementos_Finitos.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Accessed 10 May 2019].

[25] ISO 527. Available at <https://www.sis.se/api/document/preview/914344>

### **Consulta**

Anon, (2019). [online] Available at:  
<https://www.quora.com/Why-do-3D-printers-use-a-honeycomb-structure-to-print-out-objects> [Accessed 12 May 2019].

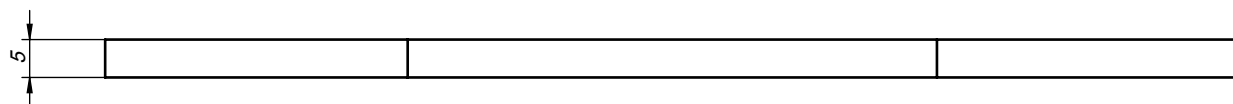
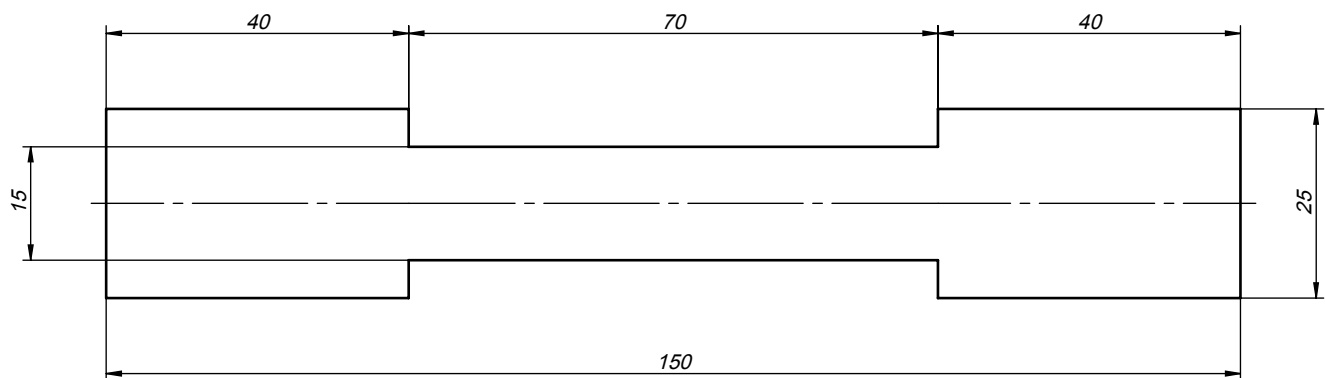
Zheng Li, J. (2015). CAD, 3D Modeling, Engineering Analysis, and Prototype Experimentation. Cham: Springer International Publishing.

Desai, C. and Kundu, T. (2001). *Introductory Finite Element Method*. Boca Raton, FL: CRC Press.

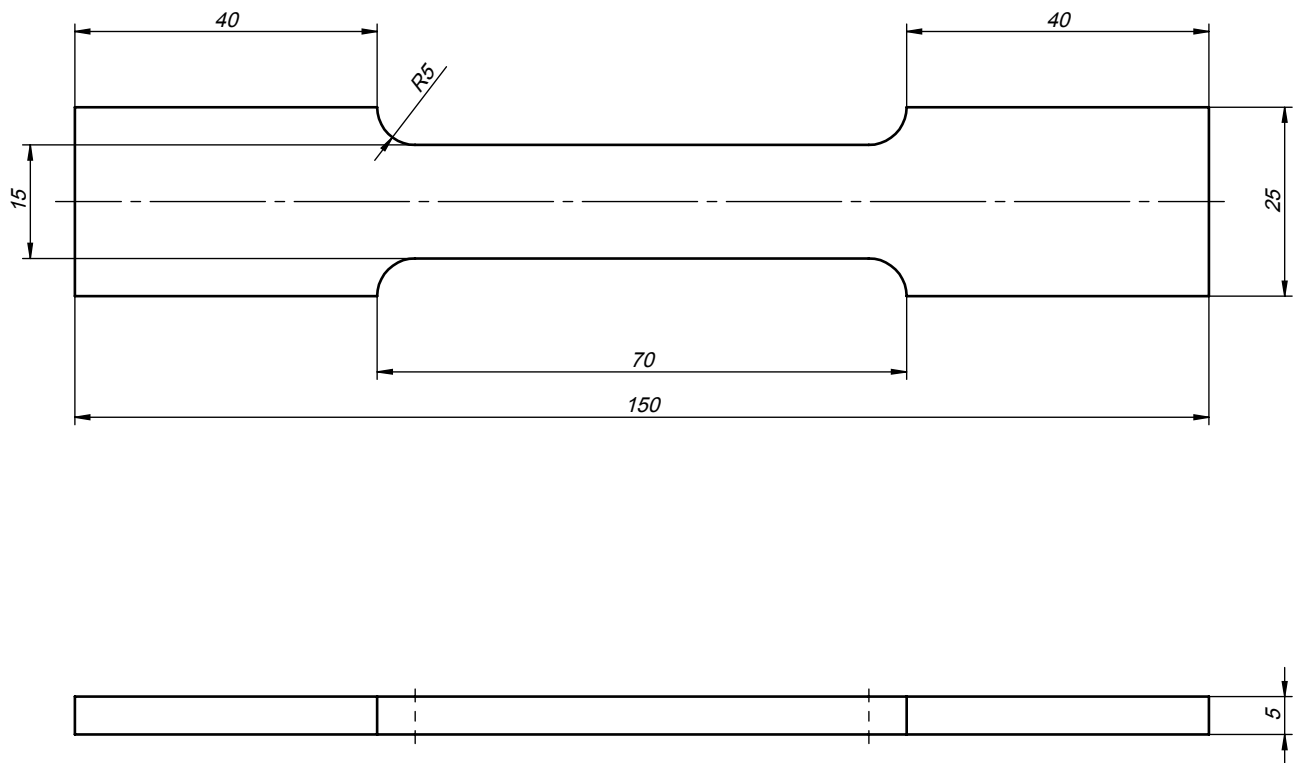
Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. (2014). West Conshohocken, Pa.: ASTM International.


## **16. Anejos**

Se adjuntan los informes realizados con elementos finitos y los planos de los 3 diseños de las probetas.

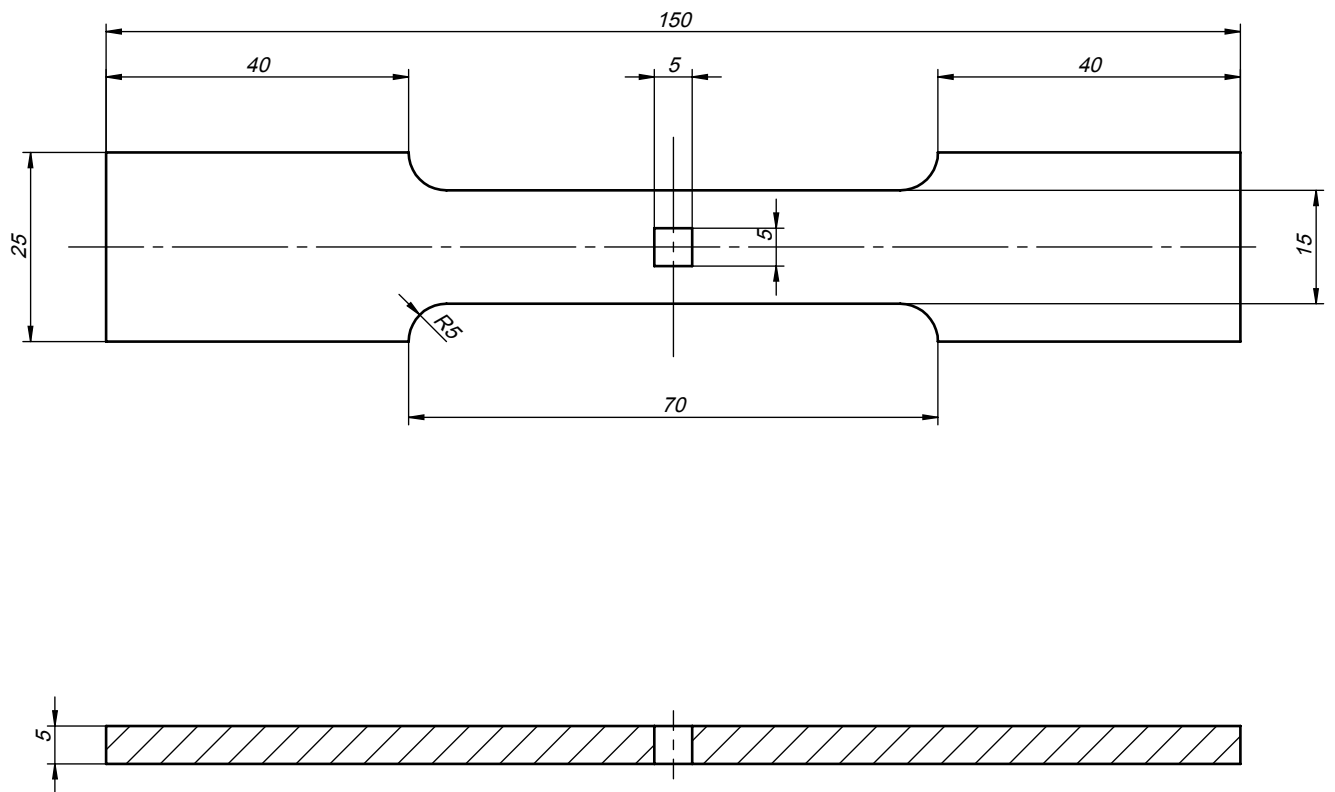


	Nombre	Fecha	Firma	<b>Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisuals de Terrassa</b>		
Dibujado	Moises Pérez Wic	07/04/2019				
Comprobado						
	Medidas sin tolerancias s/DIN7168 grado m	MATERIAL: Por determinar según el ensayo		<b>Probeta 1</b>		A4
		TFG	ESCALA : 1 : 1		PAGINA 1 DE 1	

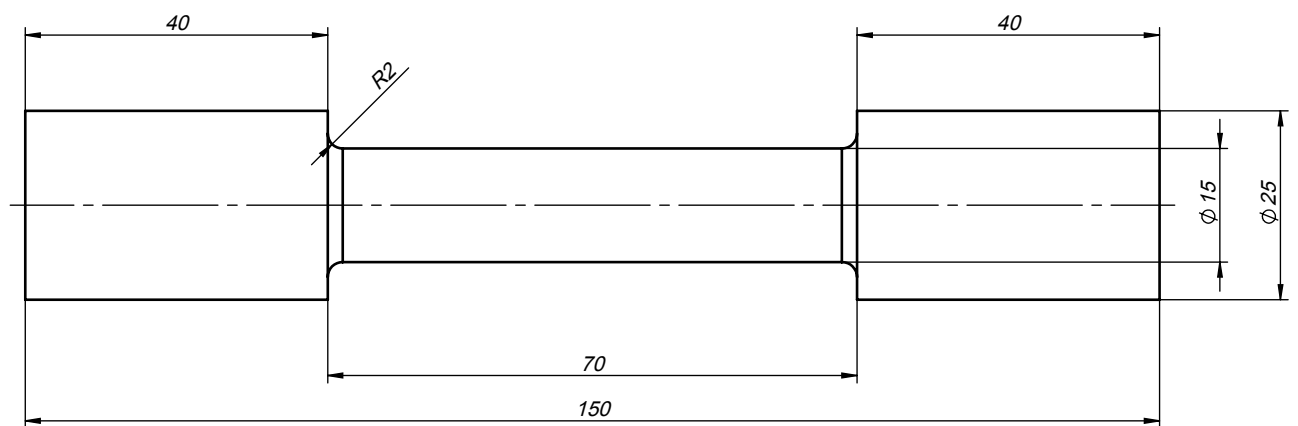


	Nombre	Fecha	Firma	Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisuals de Terrassa		
Dibujado	Moises Pérez Wic	07/04/2019				
Comprobado						
	Medidas sin tolerancias s/DIN7168 grado m		MATERIAL: Por determinar según el ensayo	Probeta 2		A4
			TFG	ESCALA : 1 : 1	PAGINA 1 DE 1	





	Nombre	Fecha	Firma	<b>Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisuals de Terrassa</b>		
Dibujado	Moises Pérez Wic	07/04/2019				
Comprobado						
	Medidas sin tolerancias s/DIN7168 grado m	MATERIAL: Por determinar según el ensayo		<b>Probeta 3</b>		A4
		TFG	ESCALA : 1 : 1		PAGINA 1 DE 1	



	Nombre	Fecha	Firma	<b>Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisuals de Terrassa</b>		
Dibujado	Moises Pérez Wic	07/04/2019				
Comprobado						
	Medidas sin tolerancias s/DIN7168 grado m		MATERIAL: Por determinar según el ensayo		<b>Probeta 4</b>	A4
			TFG	ESCALA : <b>1 : 1</b>		

# Project 1

First Saved	Monday, March 25, 2019
Last Saved	Monday, March 25, 2019
Product Version	19.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No

## Units

**TABLE 1**

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

## Geometry

**TABLE 2**  
**Model (A4) > Geometry**

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	D:\TFG\Probeta2.SLDPRT
Type	SOLIDWORKS
Length Unit	Millimeters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,15 m
Length Y	5,e-003 m
Length Z	2,5e-002 m
<b>Properties</b>	
Volume	1,5362e-005 m <sup>3</sup>
Mass	1,5976e-002 kg
Scale Factor Value	1,
<b>Statistics</b>	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	31171
Elements	6192
Mesh Metric	None
<b>Update Options</b>	
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Contact Summary	Program Controlled
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

**TABLE 9**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads**

Object Name	Fixed Support		Force	
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face		1 Edge	
Definition				
Type	Fixed Support		Force	
Suppressed	No			
Define By			Components	
Coordinate System			Global Coordinate System	
X Component			0, N (ramped)	
Y Component			-5, N (ramped)	
Z Component			0, N (ramped)	

**FIGURE 1**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Force**

## *Solution (A6)*

**TABLE 10**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution**

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
<b>Information</b>	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	4, s
MAPDL Memory Used	151, MB
MAPDL Result File Size	8,75 MB
<b>Post Processing</b>	
Beam Section Results	No
On Demand Stress/Strain	No

**TABLE 11**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information**

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Identify Element Violations	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
<b>FE Connection Visibility</b>	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type

Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

**TABLE 12**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Strain Energy
State	Solved			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
Definition				
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Strain Energy
By	Time			
Display Time	First	Last		
Calculate Time History	Yes			
Identifier				
Suppressed	No			
Results				
Minimum	0, m	4,1615e-006 m/m	3464,5 Pa	1,1497e-009 J
Maximum	1,1179e-002 m	4,6345e-003 m/m	1,1074e+007 Pa	2,9257e-005 J
Average	4,2009e-003 m	1,0713e-003 m/m	2,5452e+006 Pa	
Minimum Occurs On	Part 1			
Maximum Occurs On	Part 1			
Total				2,7935e-002 J
Information				
Time	1, s			
Load Step	1			
Substep	1			
Iteration Number	1			
Integration Point Results				
Display Option		Averaged		
Average Across Bodies		No		

**FIGURE 2**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

**TABLE 13**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	1,1179e-002	4,2009e-003

**FIGURE 3**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain**

**TABLE 14**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain**

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	4,1615e-006	4,6345e-003	1,0713e-003

**FIGURE 4**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

**TABLE 15**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	3464,5	1,1074e+007	2,5452e+006

**FIGURE 5**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy**

**TABLE 16**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy**

Time [s]	Minimum [J]	Maximum [J]	Total [J]
1,	1,1497e-009	2,9257e-005	2,7935e-002

## Material Data

### *ABS plastic*

**TABLE 17**  
**ABS plastic > Constants**

Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	9,54e-005 C <sup>-1</sup>
Isotropic Resistivity	9,95e+013 ohm m

**TABLE 18**  
**ABS plastic > Density**

Density kg m <sup>-3</sup>
1040,

**TABLE 19**  
**ABS plastic > Isotropic Elasticity**

Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
2,39e+009	0,399	3,9439e+009	8,5418e+008

**TABLE 20**  
**ABS plastic > Isotropic Thermal Conductivity**

Thermal Conductivity W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
0,258

**TABLE 21**  
**ABS plastic > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C
22,

**TABLE 22**  
**ABS plastic > Specific Heat Constant Pressure**

Specific Heat J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
1720,

**TABLE 23**  
**ABS plastic > Color**

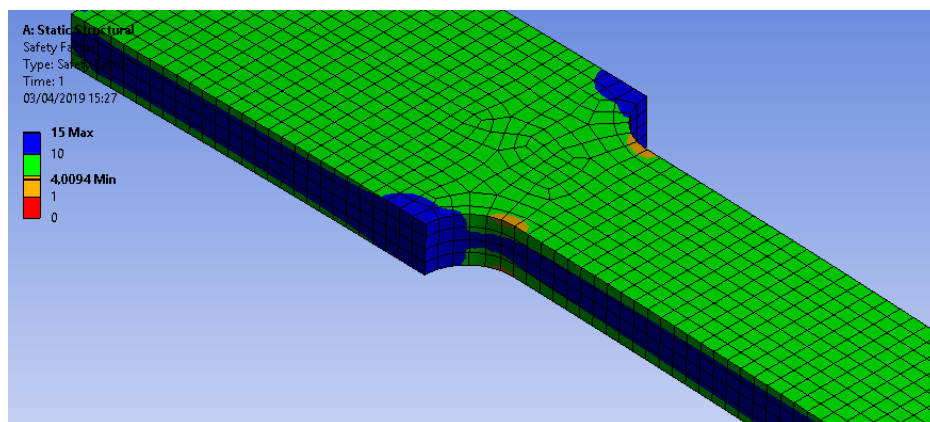
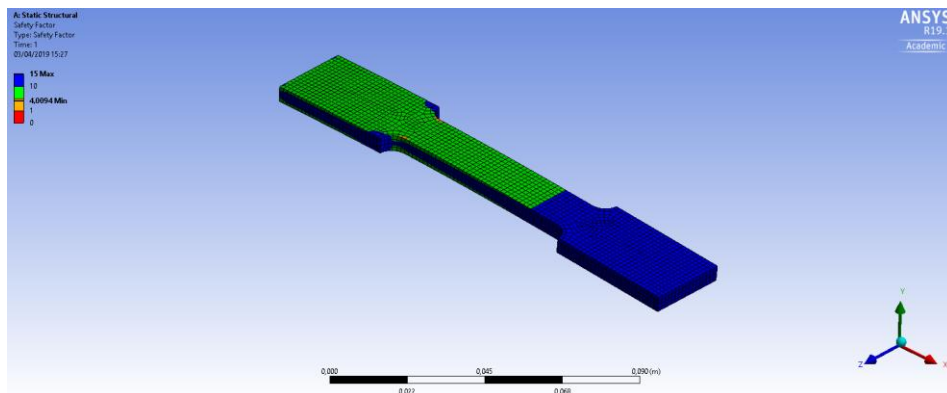
Red	Green	Blue
0,	153,	255,

**TABLE 24**  
**ABS plastic > Tensile Yield Strength**

Tensile Yield Strength Pa
4,14e+007

**TABLE 25**  
**ABS plastic > Tensile Ultimate Strength**

Tensile Ultimate Strength Pa
4,43e+007



**TABLE 15**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor**

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	4,0094	15,	12,896

# Project 2

First Saved	Wednesday, April 3, 2019
Last Saved	Wednesday, April 3, 2019
Product Version	19.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No

## Units

**TABLE 1**

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

## Model (A4)

### Geometry

**TABLE 2**  
**Model (A4) > Geometry**

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	D:\TFG\Probeta3.SLDPRT
Type	SOLIDWORKS
Length Unit	Millimeters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,15 m
Length Y	5,e-003 m
Length Z	2,5e-002 m
<b>Properties</b>	
Volume	1,5237e-005 m³
Mass	1,5846e-002 kg
Scale Factor Value	1,
<b>Statistics</b>	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	29252
Elements	5784
Mesh Metric	None
<b>Update Options</b>	
Assign Default Material	No
<b>Basic Geometry Options</b>	
Solid Bodies	Yes
Surface Bodies	Yes



**Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads**

Object Name	Fixed Support		Force	
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face		1 Edge	
Definition				
Type	Fixed Support		Force	
Suppressed	No			
Define By			Components	
Coordinate System			Global Coordinate System	
X Component			0, N (ramped)	
Y Component			-5, N (ramped)	
Z Component			0, N (ramped)	

**FIGURE 1**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Force**

***Solution (A6)***

**TABLE 11**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution**

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
<b>Information</b>	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	11, s
MAPDL Memory Used	146, MB
MAPDL Result File Size	8,1875 MB
<b>Post Processing</b>	
Beam Section Results	No
On Demand Stress/Strain	No

**TABLE 12**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information**

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Identify Element Violations	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
<b>FE Connection Visibility</b>	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No

Line Thickness	Single
Display Type	Lines

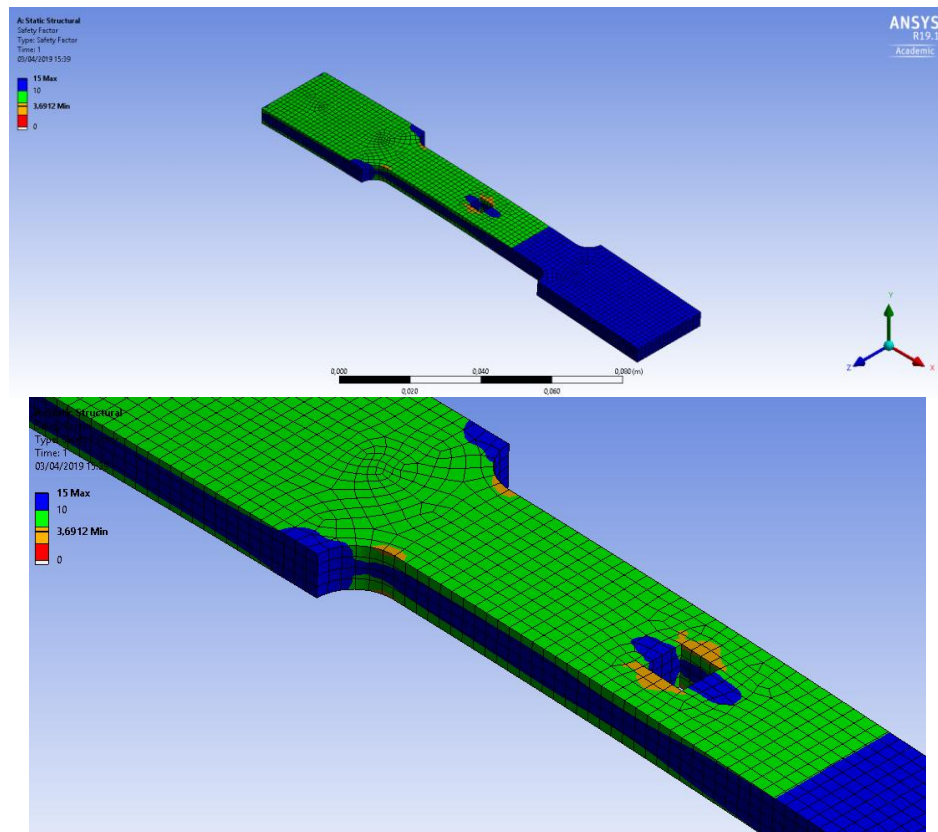
**TABLE 13**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Safety Tools**

Object Name	<i>Stress Tool</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Theory	Max Equivalent Stress
Stress Limit Type	Tensile Ultimate Per Material

**TABLE 14**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Results**

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Safety Factor
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
<b>Integration Point Results</b>	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
<b>Results</b>	
Minimum	3,6912
Minimum Occurs On	Part 1
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

**FIGURE 2**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor**



**TABLE 15**

**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor**

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	3,6912	15,	12,792

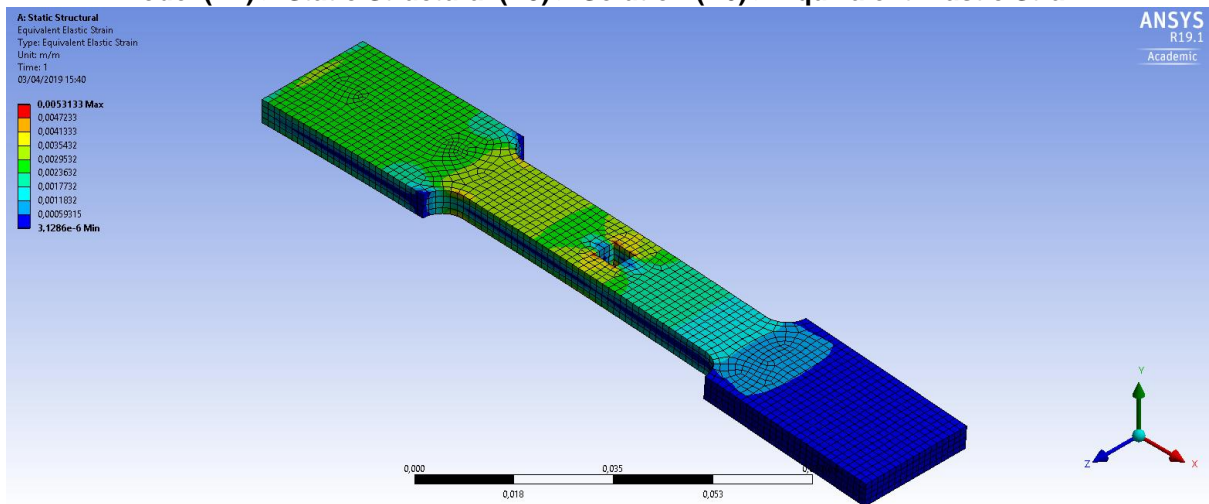
**TABLE 16**

**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results**

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results				
Object Name	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Strain Energy	Total Deformation
State	Solved			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
Definition				
Type	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Strain Energy	Total Deformation
By	Time			
Display Time	Last			
Calculate Time History	Yes			
Identifier				
Suppressed	No			
Integration Point Results				
Display Option	Averaged			
Average Across Bodies	No			
Results				
Minimum	3,1286e-006 m/m	2870, Pa	1,3212e-009 J	0, m

Maximum	5,3133e-003 m/m	1,2001e+007 Pa	3,3294e-005 J	1,1533e-002 m
Average	1,1143e-003 m/m	2,6404e+006 Pa		4,1744e-003 m
Minimum Occurs On	Part 1			
Maximum Occurs On	Part 1			
Total			2,8821e-002 J	
<b>Information</b>				
Time	1, s			
Load Step	1			
Substep	1			
Iteration Number	1			

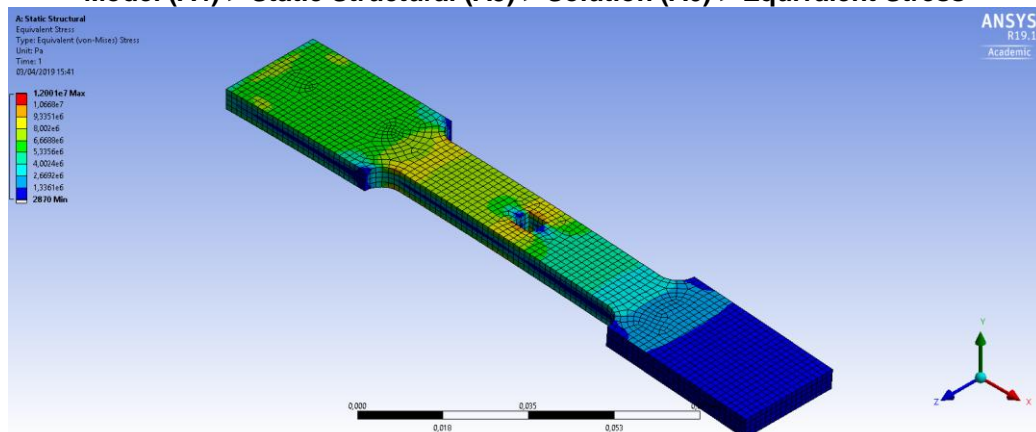
**FIGURE 3**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain**



**TABLE 17**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain**

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	3,1286e-006	5,3133e-003	1,1143e-003

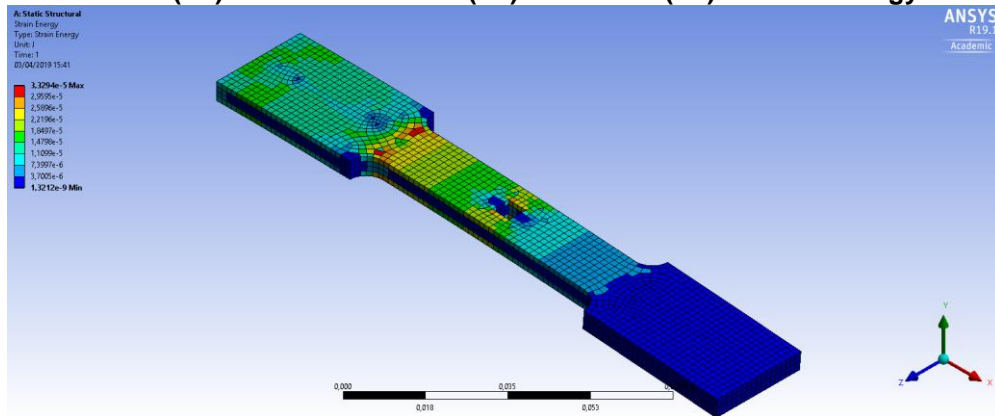
**FIGURE 4**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**



**TABLE 18**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	2870,	1,2001e+007	2,6404e+006

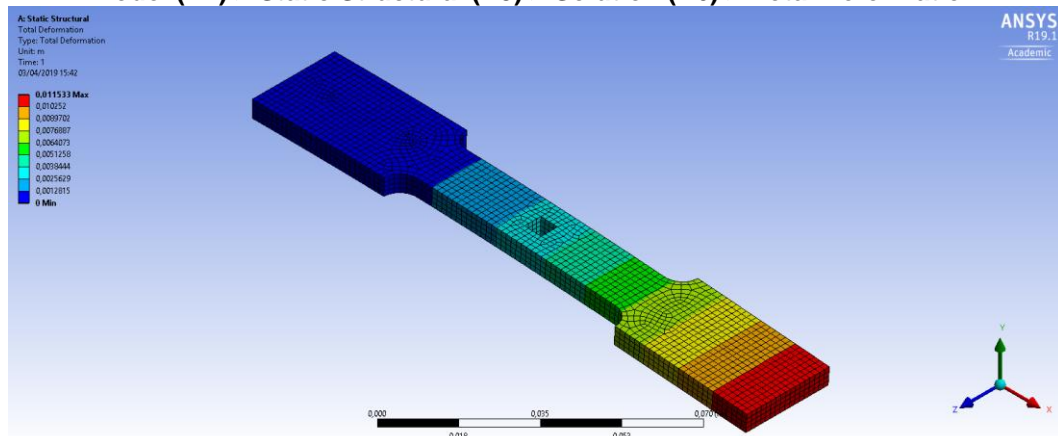
**FIGURE 5**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy



**TABLE 19**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy

Time [s]	Minimum [J]	Maximum [J]	Total [J]
1,	1,3212e-009	3,3294e-005	2,8821e-002

**FIGURE 6**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation



**TABLE 20**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	1,1533e-002	4,1744e-003

## Material Data

### *ABS plastic*

**TABLE 21**  
ABS plastic > Constants

Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	9,54e-005 C <sup>-1</sup>
Isotropic Resistivity	9,95e+013 ohm m

**TABLE 22**  
**ABS plastic > Density**

Density kg m <sup>-3</sup>
1040,

**TABLE 23**  
**ABS plastic > Isotropic Elasticity**

Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
2,39e+009	0,399	3,9439e+009	8,5418e+008

**TABLE 24**  
**ABS plastic > Isotropic Thermal Conductivity**

Thermal Conductivity W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
0,258

**TABLE 25**  
**ABS plastic > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C
22,

**TABLE 26**  
**ABS plastic > Specific Heat Constant Pressure**

Specific Heat J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
1720,

**TABLE 27**  
**ABS plastic > Color**

Red	Green	Blue
0,	153,	255,

**TABLE 28**  
**ABS plastic > Tensile Yield Strength**

Tensile Yield Strength Pa
4,14e+007

**TABLE 29**  
**ABS plastic > Tensile Ultimate Strength**

Tensile Ultimate Strength Pa
4,43e+007

# Project 3

First Saved	Wednesday, April 3, 2019
Last Saved	Wednesday, April 3, 2019
Product Version	19.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No

## Units

**TABLE 1**

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

## Model (A4)

### Geometry

**TABLE 2**  
**Model (A4) > Geometry**

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	D:\TFG\Probeta2.SLDPRT
Type	SOLIDWORKS
Length Unit	Millimeters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,15 m
Length Y	5,e-003 m
Length Z	2,5e-002 m
<b>Properties</b>	
Volume	1,5362e-005 m <sup>3</sup>
Mass	1,9049e-002 kg
Scale Factor Value	1,
<b>Statistics</b>	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	28075
Elements	5552
Mesh Metric	None
<b>Update Options</b>	
Assign Default Material	No
<b>Basic Geometry Options</b>	
Solid Bodies	Yes

**TABLE 10**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads**

Object Name	Fixed Support		Force	
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face		1 Edge	
Definition				
Type	Fixed Support		Force	
Suppressed	No			
Define By			Components	
Coordinate System			Global Coordinate System	
X Component			0, N (ramped)	
Y Component			-5, N (ramped)	
Z Component			0, N (ramped)	

**FIGURE 1**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Force**

## ***Solution (A6)***

**TABLE 11**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution**

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
<b>Information</b>	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	4, s
MAPDL Memory Used	144, MB
MAPDL Result File Size	7,875 MB
<b>Post Processing</b>	
Beam Section Results	No
On Demand Stress/Strain	No

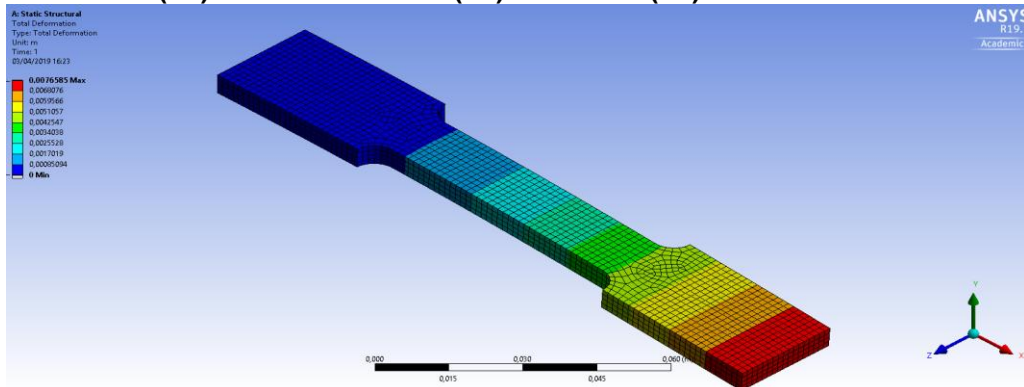
**TABLE 13**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Strain Energy
State	Solved			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
Definition				
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Strain Energy
By	Time			
Display Time	Last			
Calculate Time History	Yes			
Identifier				



Suppressed	No			
	Results			
Minimum	0, m	3,9508e-006 m/m	744,96 Pa	8,3914e-010 J
Maximum	7,6585e-003 m	3,1504e-003 m/m	1,1024e+007 Pa	2,0889e-005 J
Average	2,8419e-003 m	7,3501e-004 m/m	2,5574e+006 Pa	
Total				1,9139e-002 J

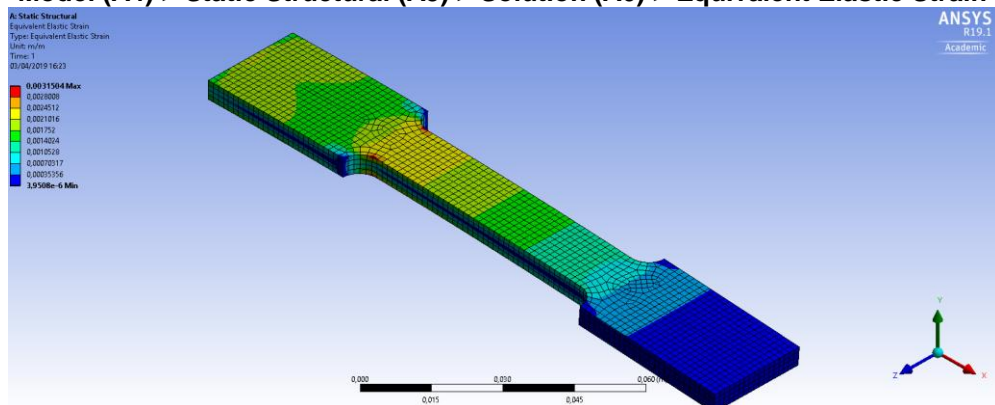
**FIGURE 2**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation



**TABLE 14**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	7,6585e-003	2,8419e-003

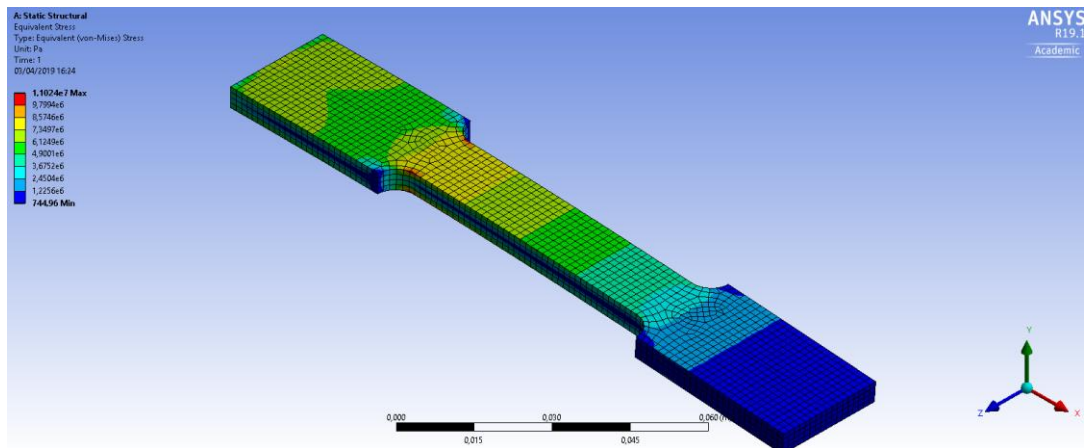
**FIGURE 3**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain



**TABLE 15**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	3,9508e-006	3,1504e-003	7,3501e-004

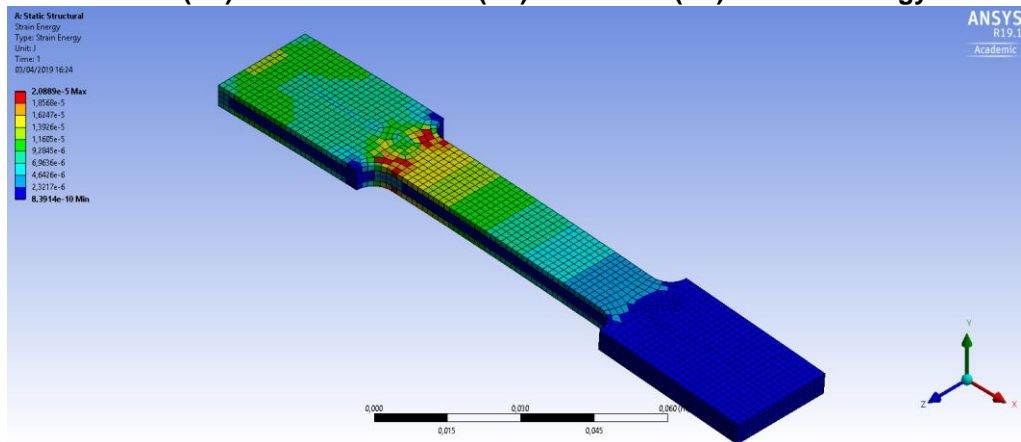
**FIGURE 4**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress



**TABLE 16**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	744,96	1,1024e+007	2,5574e+006

**FIGURE 5**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy**



**TABLE 17**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy**

Time [s]	Minimum [J]	Maximum [J]	Total [J]
1,	8,3914e-010	2,0889e-005	1,9139e-002

**TABLE 18**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Safety Tools**

Object Name	<i>Stress Tool</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Theory	Max Equivalent Stress
Stress Limit Type	Tensile Yield Per Material

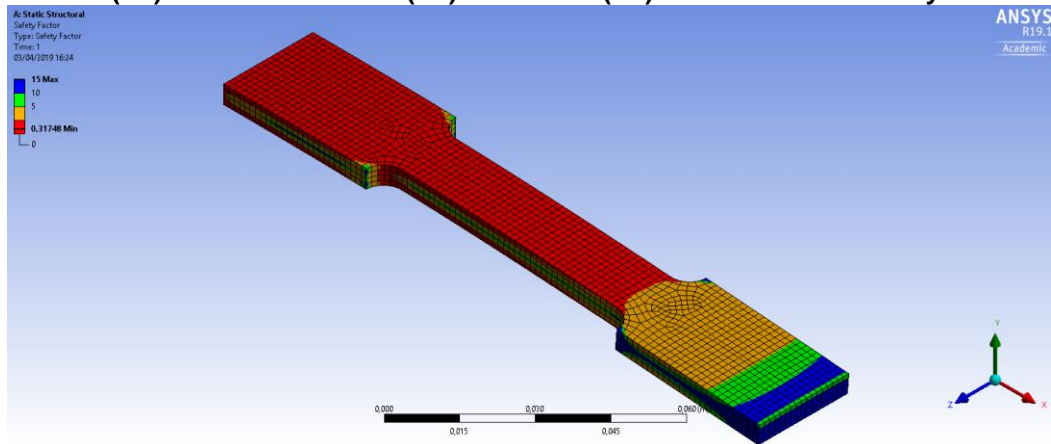
**TABLE 19**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Results**

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection

Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Safety Factor
By	Time
Display Time	Last
<b>Integration Point Results</b>	
Display Option	Averaged
<b>Results</b>	
Minimum	0,31748

**FIGURE 6**

**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor**



**TABLE 20**

**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor**

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	0,31748	15,	4,8796

## Material Data

### PLA

**TABLE 21**

**PLA > Constants**

Density	1240, kg m <sup>-3</sup>
---------	--------------------------

**TABLE 22**

**PLA > Color**

Red	Green	Blue
155,	244,	255,

**TABLE 23**

**PLA > Isotropic Elasticity**

Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa	Temperature C
3,5e+009	0,36	4,1667e+009	1,2868e+009	

**TABLE 24**

**PLA > Tensile Yield Strength**

Tensile Yield Strength Pa
---------------------------

# Project 4

First Saved	Wednesday, April 3, 2019
Last Saved	Wednesday, April 3, 2019
Product Version	19.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No

## Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads

Object Name	Fixed Support		Force	
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face		1 Edge	
Definition				
Type	Fixed Support		Force	
Suppressed	No			
Define By			Components	
Coordinate System			Global Coordinate System	
X Component			0, N (ramped)	
Y Component			-5, N (ramped)	
Z Component			0, N (ramped)	

**FIGURE 1**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Force

## Solution (A6)

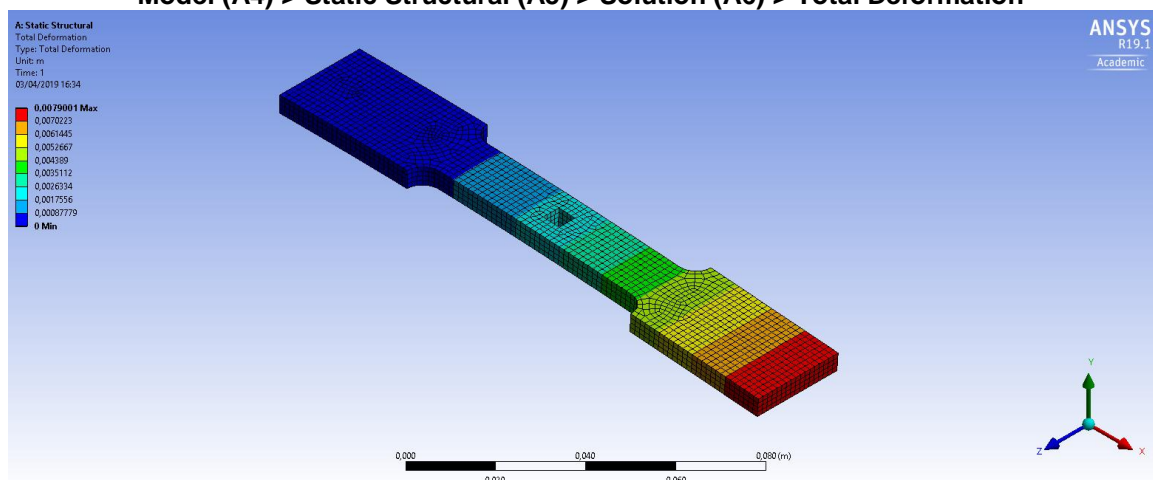
**TABLE 11**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
<b>Information</b>	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	12, s
MAPDL Memory Used	146, MB
MAPDL Result File Size	8,1875 MB
<b>Post Processing</b>	
Beam Section Results	No
On Demand Stress/Strain	No

**TABLE 13**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Strain Energy
State	Solved			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
Definition				
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Strain Energy
By	Time			
Display Time	Last			
Calculate Time History	Yes			
Identifier				
Suppressed	No			
Results				
Minimum	0, m	2,5048e-006 m/m	3202,8 Pa	8,4077e-010 J
Maximum	7,9001e-003 m	3,6299e-003 m/m	1,2003e+007 Pa	2,2761e-005 J
Average	2,8624e-003 m	7,6078e-004 m/m	2,6407e+006 Pa	
Minimum Occurs On	Part 1			
Maximum Occurs On	Part 1			
Total				1,9742e-002 J

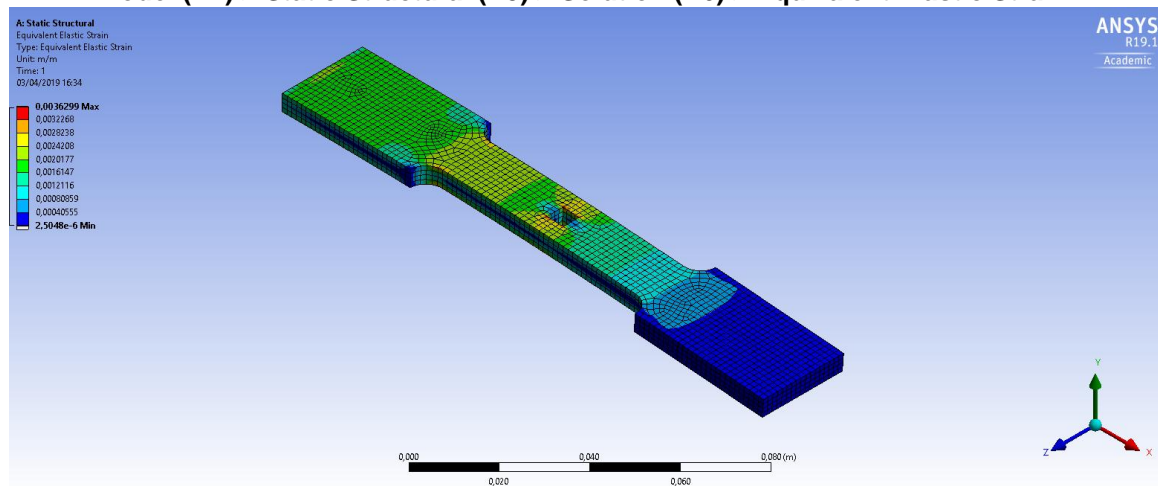
**FIGURE 2**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**



**TABLE 14**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	7,9001e-003	2,8624e-003

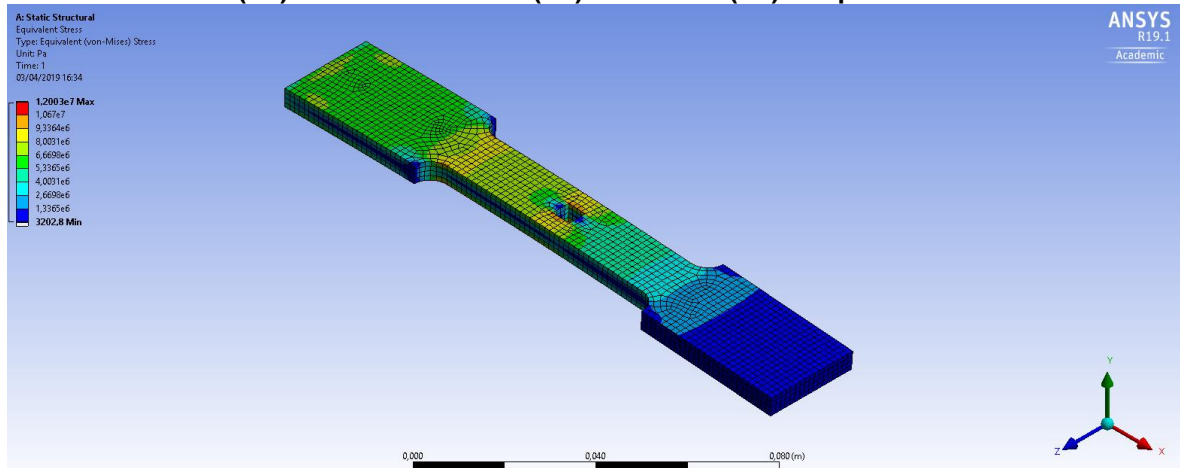
**FIGURE 3**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain**



**TABLE 15**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain**

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	2,5048e-006	3,6299e-003	7,6078e-004

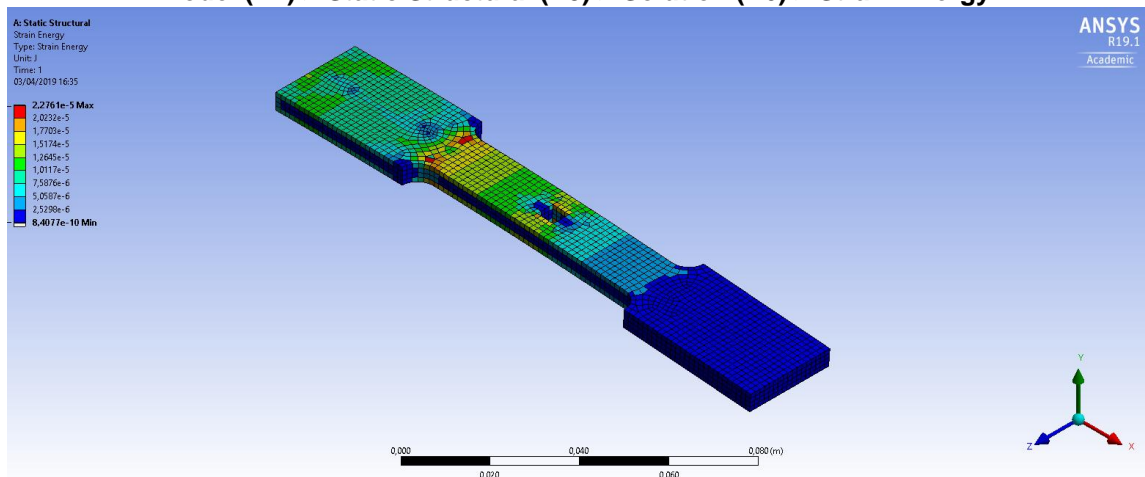
**FIGURE 4**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**



**TABLE 16**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	3202,8	1,2003e+007	2,6407e+006

**FIGURE 5**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy**



**TABLE 17**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Strain Energy**

Time [s]	Minimum [J]	Maximum [J]	Total [J]
1,	8,4077e-010	2,2761e-005	1,9742e-002

**TABLE 18**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Safety Tools**

Object Name	<i>Stress Tool</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Theory	Max Equivalent Stress
Stress Limit Type	Tensile Yield Per Material

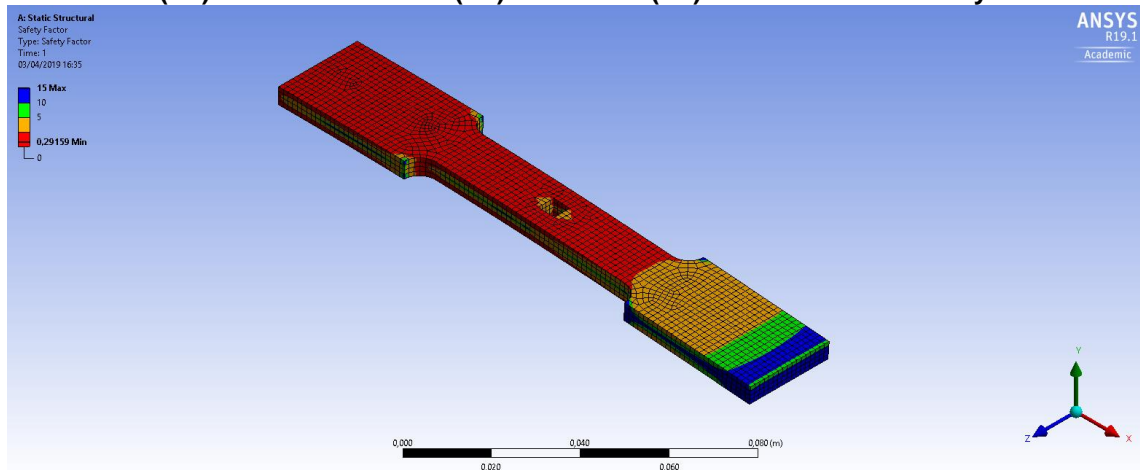
**TABLE 19**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Results**

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Safety Factor
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
<b>Integration Point Results</b>	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
<b>Results</b>	
Minimum	0,29159
Minimum Occurs On	Part 1
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1

Substep	1
Iteration Number	1

**FIGURE 6**

**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor**



**TABLE 20**

**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor**

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	0,29159	15,	4,7045

## Material Data

### PLA

**TABLE 21**

**PLA > Constants**

Density	1240, kg m <sup>-3</sup>
---------	--------------------------

**TABLE 22**

**PLA > Color**

Red	Green	Blue
155,	244,	255,

**TABLE 23**

**PLA > Isotropic Elasticity**

Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa	Temperature C
3,5e+009	0,36	4,1667e+009	1,2868e+009	

**TABLE 24**

**PLA > Tensile Yield Strength**

Tensile Yield Strength Pa
3,5e+006